



Markus Markkanen

## **Sähköautojen akkujen kiertotalous**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.05.2016

Valvoja: Professori Kari Tammi

Ohjaajat: Tanja Kallio, Panu Sainio

---

**Tekijä** Markus Markkanen

---

**Työn nimi** Sähköautojen akkujen kiertotalous

---

**Koulutusohjelma** Konetekniikka

---

**Pää-/sivuaine** Koneensuunnittelu

**Koodi** K3001

---

**Työn valvoja** Kari Tammi

---

**Työn ohjaajat** Tanja Kallio, Panu Sainio

---

**Päivämäärä** 30.05.2016

**Sivumäärä** 56

**Kieli** suomi

---

### **Tiivistelmä**

Huoli ympäristöstä ja fossiilisten polttoaineiden käytöstä sekä tiukentuneet päästö- ja ympäristömääräykset ovat vieneet autoteollisuuden kehitystä sähkö- ja hybridautojen suuntaan. Sähkö- ja hybridautojen edut ovat selkeät polttomoottorikäyttöisiin autoihin verrattuna, sillä niiden elinkaaren kokonaisenergiankulutus on parhaimmillaan 40 prosenttia matalampi. Hiilidioksidipäästöjen määrä riippuu kuitenkin sähköntuotannon päästöistä. Sähkö- ja hybridautojen määrän on oletettu kasvavan voimakkaasti jo vuoteen 2020 mennessä. Kasvavan sähköautoilun myötä tulevaisuuden haasteeksi nousee myös akkujätteen määrän kasvu.

Nykyisin sähkö- ja hybridautojen ajoakkuina käytetään pääasiassa litiumioniakkuja, joiden kierrätys on ollut vähäistä aiemmin kuluttajaelektroniikan aikakautena. Litiumioniakkuja koskevat kierrätysmääräykset ovat väljiä erityisesti ajoneuvokäytössä oleville akuille, sillä akkujen järeät muovista ja metallista valmistetut tukirakenteet kierrättämällä saavutetaan huomattava osa 50 massaprocentin kierrätystavoitteesta. Myös erot käytetyissä akkukemioissa aiheuttavat ongelmia kierrätysprosessien luomiseen.

Kiertotaloutta voidaan soveltaa näihin ongelmiin resurssien ja materiaalien paremman sekä tehokkaamman käytön avulla. Ajoakkuja voitaisiin esimerkiksi käyttää uudelleen eri käyttökohteissa, tai niitä voitaisiin kunnostaa takaisin alkuperäiseen käyttökohteeseen. Tämä pienentäisi uusien akkujen valmistamistarvetta, jolloin uudelleenkäytön ja kunnostuksen avulla olisi mahdollista saavuttaa merkittäviä taloudellisia ja ekologisia hyötyjä.

Uudelleenkäyttö ja kunnostus aiheuttavat kuitenkin uusia haasteita, sillä käytettyjen litiumioniakkujen turvallisuus on aiemmin käytössä olleita nikkelimetallihydridi- ja lyijy-akkuja heikompi. Tämä nostaa esille vastuukysymyksiä uudelleenkäyttöön ja kunnostustoimintaan liittyen. Lisäksi ongelmana on myös tämänhetkinen ajoneuvoakkujen standardoinnin puute, joka aiheuttaa lisäkustannuksia esimerkiksi poikkeavien jännitetasojen, liitäntöjen ja kiinnitysten vuoksi.

Diplomityössä tutkitaan kiertotalouden tarjoamien eri vaihtoehtojen vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia sekä tutkitaan suositeltavia toimintatapoja erilaisiin akuston elinkaaren tilanteisiin. Lisäksi selvitetään eri toimintavaihtoehtojen taloudellista ja ekologista potentiaalia sekä ajoakkujen markkinoiden arvoa Suomessa.

---

**Avainsanat** Sähköauto, kiertotalous, akku, uusiokäyttö, kunnostus, kierrätys

---



---

**Author** Markus Markkanen

---

**Title of thesis** Circular economy of electric car batteries

---

**Degree programme** Mechanical Engineering

---

**Major/minor** Machine design

**Code** K3001

---

**Thesis supervisor** Kari Tammi

---

**Thesis advisors** Tanja Kallio, Panu Sainio

---

**Date** 30.05.2016

**Number of pages** 56

**Language** Finnish

---

### **Abstract**

Environmental concerns, laws, and regulations have lead the car industry more towards to greener solutions in the form of electric and hybrid cars. Compared to traditional internal combustion engine powered cars, electric and hybrid cars use up to 40 percent less energy through their life cycle. The total carbon dioxide emissions over the life cycle depend on electricity production method. The amount of electric and hybrid cars is estimated to grow rapidly by 2020. The increasing amount of electric cars creates another challenge: growing amount of battery waste in the future.

Electric and hybrid cars use mainly lithium-ion (Li-ion) batteries for traction energy storage. Only a small fraction of Li-ion batteries have been recycled in recent years. Li-ion battery recycling regulations are quite lenient especially for automotive batteries. A significant portion of the recycling target can be achieved with proper recycling of the automotive battery casing. Differences between Li-ion battery chemistries cause problems for optimizing recycling processes.

Circular economy approaches can be used to solve some of these challenges. A better usage of materials and resources can be achieved with battery second life use or refurbishing. This would reduce the need for new batteries, which means that significant financial and ecological savings can be achieved by enhancing the re-use of the batteries.

There are challenges in second life use and refurbishing. Used Li-ion batteries are less safe than nickel-metal hydride and lead-acid batteries that were used earlier. Second life and refurbishing market and business depends largely on the liability of the battery provider. The lack of standardisation in today's automotive battery industry make re-use more expensive and more complex as different batteries use different connectors, attachment mechanisms and voltage levels.

The thesis examines the strengths, weaknesses, opportunities and threats related to different circular economy methods and cases. Recommendations through the different stages of battery life cycle are provided and economical and financial potential of each option is examined. Estimated financial values of battery market in Finland are also included.

---

**Keywords** Electric car, Circular economy, Battery, Second life, Refurbishing, Recycling

---

## Alkusanat

Kiertotalous on selkeästi yksi tulevaisuuden kiinnostavimmista suuntauksista myös tekniikan alalla. Tulevaisuuden niukkenevien resurssien taloudessa materiaalien ja resurssien tehokkaamman käytön rooli tulee todennäköisimmin kasvamaan huomattavasti. Päädyimme työn aiheeseen aiempien akkukierrätystä koskevien ehdotusten pohjalta, ja aihetta kaventamalla saatoimme hyötyä omasta osaamisestani ja useamman vuoden kokemuksestani autoalalla.

Kiitän erityisesti professori Kari Tammea sekä ohjaajiani professori Tanja Kalliota ja yli-insinööri Panu Sainiota. Näiden henkilöiden eri osaamisalueet ovat yhdistyneet hienosti diplomityöni tekoaikana, ja heistä on ollut suuri apu työtä tehdessä.

Lisäksi kiitän vanhempiani, joiden henkinen ja taloudellinen tuki on ollut enemmän kuin tarpeen opiskeluaikanani.

Taloudellisesta tuesta kiitän myös Yrjö ja Senja Koivusen säätiötä sekä Henry Fordin säätiötä, joiden lahjoittamien stipendien avulla työn toteuttaminen on ollut taloudellisesti helpompaa.

Espoo 20.5.2016



Markus Markkanen

# Sisällysluettelo

1 Johdanto .....	1
1.1 Taustat .....	2
1.2 Motivaatio .....	3
1.3 Tavoitteet.....	4
2. Menetelmät.....	5
2.1 Ajoneuvoissa käytettävät akkutyypit .....	5
2.1.1 Litiumioniakut.....	9
2.1.2 Akkuvarusteet .....	13
2.1.3 Sähköautojen ja akkujen määrä.....	16
2.1.4 Tulevaisuuden ennusteet .....	21
2.2 Akkujen ajoneuvokäytöstä poisto .....	24
2.2.1 Akkujen uudelleenkäyttö .....	28
2.2.2 Akkujen kunnostus.....	32
2.2.3 Kierrätys.....	33
2.3 Turvallisuus.....	36
2.3.1 Akun vikaantuminen .....	36
2.3.2 Korkeajännite ja käsittely.....	40
2.3.3 Käytöstä poistettujen akkujen logistiikka .....	40
3 Tulokset.....	42
3.1 Akkujen uusiokäyttö .....	45
3.2 Akkujen kunnostus.....	47
3.3 Akkujen kierrätys.....	49
4 Pohdinta .....	51
4.1 Tulevaisuuden tutkimusaiheita.....	52
Lähdeluettelo.....	53

## Lyhenteet

CAN = Controller Area Network, esimerkiksi ajoneuvoissa käytetty automaatioväylä

DOD = Depth of Discharge, akun purkaussyvyys prosentteina

EOL = End of Life, loppuun käytetty

EPA = US Environmental Protection Agency, Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto

IEA = International Energy Agency

IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö

NCA = Litiumnikkelikobolttialumiinioksidi

NHTSA = National Highway Traffic Safety Administration

NMC = Litiumnikkelimangaanikobolttioksidi

OPEC = The Organization of the Petroleum Exporting Countries

RFID = Radio-frequency identification, radiotaajuinen etätunnistus

SAE = Society of Automotive Engineers

SOC = State of Charge, akun varaustilanne prosentteina täydestä varauksesta

SOF = State of Function, akun toimintakyky, usein SOC ja SOH yhdistettynä

SOH = State of Health, prosenttiluku uuden akun suorituskykyyn verrattuna

# 1 Johdanto

Kiertotalouden kantavana ajatuksena on resurssien ja materiaalien käytön tehostus ja jätteen määrän minimointi. Kiertotalouden suurin taloudellinen ja ekologinen potentiaali ei kuitenkaan ole materiaalivirroissa tai jätteessä. Kierrätyksen sijaan uudelleenkäyttö, huolto ja uudelleenvalmistus tarjoavat mahdollisimman suuren arvon tuotteelle. Sitran teettämän selvityksen mukaan kiertotalous tarjoaa Suomelle 1,5–2,5 miljardin euron koisen arvonlisäyksen. (Sitra, 2015)

Ajoneuvopuolella kiertotaloutta harjoittaa esimerkiksi ranskalainen autonvalmistaja Renault. Ranskan Choisy le Royssä sijaitseva tehdas korjaa ja huoltaa autojen käytettyjä komponentteja vesipumpuista moottoreihin. Korjatut komponentit myydään 50–70 prosentilla alkuperäishinnasta vuoden takuulla. Kiertotalouden avulla Renault on saavuttanut selviä kulutussäästöjä – 80 prosentin säästö energiasta, 88 prosentin säästö vedestä sekä 77 prosenttia pienemmät jätemäärät. (MacArthur Foundation, 2014)

Henkilöautopuolella on myös uusia haasteita tulevaisuudessa. Sähkö- ja hybridautojen myyntimäärien ennustettu voimakas kasvu johtaa tulevaisuudessa akkujätteen voimakkaaseen kasvuun. On esitetty useita arvioita akkumarkkinoiden voimakkaasta kasvusta kasvavan ajoneuvokäytön takia. Sähkö- ja hybridautoja on maailmassa tällä hetkellä noin 1,2–1,5 miljoonaa kappaletta. Näiden ajoneuvoakkujen keskimääräinen koko on valtavasti kuluttajaelektroniikkaa suurempi, tyypillisesti noin 10–90 kWh.

Yksi sähköautojen ongelmista on käytettyjen ajoneuvoakkujen kierrätys. Esimerkiksi vuoden 2010 litiumioniakuista päätyi kierrätykseen vain noin 5 prosenttia. Kierrätyksestä tekee erityisen haastavaa akkukemiaan runsas vaihtelu yritysten ja akkumallien välillä, jolloin monia erilaisia akkutyppejä saattaa olla sekaisin kierrätystilanteessa. (Gies, 2015)

Diplomityössä selvitetään käytettyjen ajoneuvoakkujen eri kierrätysmahdollisuuksien vahvuuksia ja heikkouksia, sekä suositellaan eri tilanteisiin sopivia toimintatapoja. Onnistuneesti toteutetulla akkujen uusiokäyttö- ja kunnostusketjulla käytettyjen ajoneuvoakkujen taloudellinen ja ekologinen potentiaali voitaisiin hyödyntää parhaalla mahdollisella tavalla.

Käytössä oleva tieto perustuu diplomityön tekohetkellä olleeseen informaatioon. Tulevaisuudessa akkujen määrän oletetaan kasvavan tasaisesti, mutta eksponentiaalista kasvua ei oleteta lähivuosina. Ajoakkujen käytöstä poistossa on oletuksen ja simulaatioiden mukaan noin 8-15 vuoden viive sähkö- tai hybridauton myyntihetkestä.

## 1.1 Taustat

Rajallisten luonnonvarojen kulutuksen kasvu on johtanut kestäväen kehityksen ja kiertotalouden syntyyn. Teollisuudessa käytetäänkin nykyisin ”3R”-periaatetta, joka on lyhenne sanoista vähennä, uudelleenkäytä ja kierrätä (reduce, reuse, recycle). Erityisesti autoteollisuudella on suuri merkitys ympäristövaikutuksiin alan suuren koon vuoksi. Autovalmistajilla on jo auton osien suunnitteluvaiheessa tärkeä rooli kierrätyksen ja uusio-  
käytön toteuttamiseksi. (Tian et al., 2013)

Alun perin autojen kehityksen alkuvaiheessa polttomoottorit, sähkömoottorit ja höyryautot kilpailivat tasaväkisesti auton voimanlähteinä 1900-luvun taitteessa. Nykyiset henkilöautot käyttävät kuitenkin voimanlähteenään pääasiassa polttomoottoria. Näiden otto- ja dieselmoottoreiden polttoaine valmistetaan pääasiassa maankuoresta poratusta öljystä. Kiinnostus ajoneuvojen vaihtoehtoisia voimalinjoja kohtaan on jälleen kasvanut 1970-luvulta lähtien. Tällöin pelkona oli fossiilisten polttoaineiden loppuminen tulevaisuudessa ja polttoaineiden hinnan voimakas kasvu. Tämä näkyi myös sähköautojen ensimmäisenä uutena aaltona 1970-luvulla. Viime vuosina esimerkiksi nopeasti kirstyivät ympäristömääräykset ja hiilidioksidipäästöjen vähennystavoitteet ovat lisänneet kiinnostusta sähköautoja kohtaan.

Sähkö- ja hybridautojen edut polttomoottorikäyttöisiin autoihin verrattuna ovat selkeät. Polttomoottorikäyttöiseen autoon verrattuna täyssähköauton elinkaaren kokonaisenergiankulutus on parhaimmillaan 40 prosenttia matalampi, ja hybridautoillakin 34 prosenttia matalampi. (Aguirre et al., 2012)

Tällä hetkellä eniten käytetty uusien voimalinjojen suuntaus on sähköinen hybridivoimansiirto, jossa polttomoottorin rinnalla käytetään sähköistä voimansiirtoa. Sähköinen voimansiirto saa energiansa akustosta, jonka lataamiseen käytetään esimerkiksi auton jarrutusenergiaa, polttomoottoria tai sähköverkkoa. Akuston koko määrittyy käyttötarpeen mukaan hybridautojen muuttamista kilowattitunneista täyssähköautojen useisiin kymmeneen kilowattitunteihin. Hybridivoimansiirron haittana on kuitenkin kahden voimalinjan ja akun aiheuttama monimutkaisuus ja ylimääräinen paino.

Nykyisin suurimmalta osalta autonvalmistajista löytyy ainakin yksi automalli, joka käyttää sähköä kulutuksen pienentämiseen tai myös auton liike-energiaksi. Tulevaisuudessa fokus on siirtymässä yhä suurempaan osaan automallistosta esimerkiksi kevythybriditeknikan muodossa. Kevythybridissä auton generaattori korvataan huomattavasti suuremmalla yksiköllä, jonka avulla voidaan varastoida jarrutusenergiaa akkuun tai käyttää akun tarjoamaa sähköenergiaa auton kiihdyttämiseen pienessä mittakaavassa. Esimerkiksi saksalainen autovalmistaja Audi kertoo kevythybriditeknikan leviävän yhtiön koko mallistoon seuraavan vuosikymmenen aikana (Audi, 2015).

Sähköajoneuvojen kehityksen hidasteena on ollut akkutyypin matala energiatiheys moottoripolttoaineeseen verrattuna, pitkät latausajat sekä suurien akustojen korkea hinta. 1970-luvulla ja 1990-luvulla ajoneuvokäytössä olleista lyijyakuista onkin siirrytty ensin nikkelimetallihydridiakkuihin ja tämän jälkeen nykyisiin litiumioniakkuihin. Kookkaan akuston korkeat valmistuskustannukset näkyvät myös auton valmistuskustannuksissa –



noin 81 prosenttia sähköauton voimalinjan kustannuksista tulee akusta, 9 prosenttia sähkömoottorista ja 11 prosenttia tehoelektroniikasta (Huynh et al., 2014).

Eri autotyyppien tuottamat hiilidioksidipäästöt riippuvat kuitenkin voimakkaasti käytetystä sähköntuotantotavasta. Hiilellä tuotettu sähköenergia synnyttää hiilidioksidia keskimäärin 820 g/kWh, ja ydinvoimalla hiilidioksidia syntyy keskimäärin 12 g/kWh (Schlömer et al., 2014). Esimerkiksi Tesla Model S:n EPA:n kulutusmittauksen mukaan kivihiilellä tuotettu sähkö aiheuttaisi 195 g/km hiilidioksidipäästöt. Ydinvoimalla päästöt jäisivät lähes kaksi dekadia pienemmäksi, noin 2,8 grammaan kilometrillä.

## 1.2 Motivaatio

Ajoneuvoakkujen määrät ovat vielä kirjoitushetkellä vähäisiä muuhun akkuja käyttävään kuluttajaelektroniikkaan nähden. Vielä vuonna 2011 kannettavien sähkölaitteiden (esimerkiksi matkapuhelinten ja kameroiden) akkujen valmistukseen käytettiin 30 000 tonnia litiumkarbonaattia. Sähkö- ja hybridautojen akkuihin kului samana vuonna vain 7 000 tonnia (Hodson, 2015).

Sähkö- ja hybridautojen myynnin kehitys on kuitenkin ollut nopeaa – vuonna 2012 myynti kaksinkertaistui vuoteen 2011 verrattuna. Vuoden 2012 loppuun mennessä sähkö- ja hybridautoja oli maailmassa hieman yli 180 000 yksilöä, mikä vastasi noin 0,02 prosenttia maailman autokannasta (IEA, 2013).

Vuonna 2015 täyssähköautoja oli maailmassa eri arvioiden mukaan jopa yli 700 000 kappaletta. Vastaavasti sähkö- ja hybridautojen yhteenlaskettu määrä oli arviolta noin 1,2–1,5 miljoonaa kappaletta. Autojen kokonaismäärä ylitti kuitenkin jo vuonna 2014 1,2 miljardia kappaletta. Sähkö- ja hybridautojen osuus maailman autokannan kokonaismäärästä on siis vielä alhainen, noin 0,12 prosenttia. Vuodesta 2012 eteenpäin sähkö- ja hybridautojen määrän kasvu on kuitenkin ollut merkittävää.

Myös tulevaisuudessa sähkö- ja hybridautojen myyntimäärien oletetaan kasvavan hyvin voimakkaasti. Vuonna 2025 ajoneuvoakkujen valmistukseen uskotaan kuluvan jopa 205 000 tonnia litiumkarbonaattia, kun kuluttajaelektroniikka arvioidaan vaativan 110 000 tonnia. (Hodson, 2015)

Kierrätystä tehokkaampi vaihtoehto käytetyn akun tarjoaman kokonaishyödyn kannalta voisi olla akkujen uusiokäyttö (Second Life). Vaikka akuston kapasiteetti ja purkuvirta eivät riittäisi enää alkuperäiseen ajoneuvokäyttöön, uusia matalampikuormaisia käyttökohteita on mahdollista löytää. Käytetyt akustot voisivat soveltua esimerkiksi sähkön varastointiin kuormitustilanteen tasaamiseksi (Elkind, 2014). Uudelleenkäytön myötä nousee kuitenkin merkittäviä vastuukysymyksiä. Uudelleenkäyttöön siirtyminen vaatii akuston historian ja kunnon tarkan selvityksen vaurioituneiden ja loppuun käytettyjen litiumioniakkujen huonon turvallisuuden takia.

Myös autonvalmistajat ovat heränneet uusiokäytön tarjoamiin mahdollisuuksiin. Suuret autonvalmistajat, kuten General Motors ja Nissan, ovat tehneet muutamaa sähköauton

ajoakkua käyttäviä prototyyppejä sähkön varastointia varten. Näiden avulla tasataan autonvalmistajien omien laitosten sähkönkulutuksen piikkejä. (Cardwell, 2015)

Akkuja kunnostamalla ja heikoimpia kennoja vaihtamalla ajoakkujen käyttöikää voitaisiin pidentää merkittävästi. Kunnostuksen avulla kuluneet akut voitaisiin palauttaa myös alkuperäiseen käyttökohteeseensa. Tämän lisäksi olisi mahdollista saavuttaa selviä kustannus- ja energiasäästöjä kokonaisten akkujen vaihtamiseen verrattuna.

Tällä hetkellä kierrätyksen avulla osa akuissa käytetyistä materiaaleista saadaan kiertoon uusien akkujen valmistamista varten. Tämä ei kuitenkaan käytä hyödyksi akkujen jäljellä olevaa kapasiteettia. Kehittynyt ja tehokas kierrätys on silti tärkeä osa kiertotaloutta, sillä koko elinkaarensa lopuksi tuote päättyy joka tapauksessa kierrätettäväksi ja uusiksi raaka-aineiksi.

### **1.3 Tavoitteet**

Diplomityön tavoitteena on selvittää, minkälaista taloudellista ja ekologista hyötyä voidaan saavuttaa kiertotalouden avulla sähkö- ja hybridautoissa ajoakkuina käytetyille litiumioniakuille. Kiertotalouden päällimmäisenä tavoitteena on jätteen määrän minimointi ja materiaalien käytön tehostus uudelleenkäytön, huollon ja kunnostuksen kautta. Tulevaisuudessa sähkö- ja hybridautojen määrän oletetaan kasvavan huomattavasti, jolloin myös akkujätteen määrä tulee kasvamaan voimakkaasti.

Ajoneuvokäytöstä poistetuille akuille on tällä hetkellä nähtävissä kolme prosessointivaihtoehtoa: kierrätys, uudelleenkäyttö tai kunnostus. Vaikka litium on teoriassa täysin kierrätettävissä, sen kierrätys on tällä hetkellä huomattavasti kalliimpaa kuin uuden litiumin valmistus. Litiumin määrä maapallolla on kuitenkin rajallinen, kuten esimerkiksi öljyn, joten sopivan kierrätysmenetelmän löytäminen on pidemmällä aikavälillä tärkeää. (Jawad, 2010, s. 52)

Tässä diplomityössä selvitetään näiden prosessivaihtoehtojen vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia kiertotalouden näkökulmasta, sekä litiumioniakkuja yleisesti koskevia riskejä. Lisäksi työssä suositellaan toimintatapoja akun elinkaaren eri vaiheisiin. Tavoitteena on myös arvioida Suomen markkinoiden taloudellista arvoa, sekä tutkia eri prosessointimenetelmien taloudellisia ja ekologisia vahvuuksia.

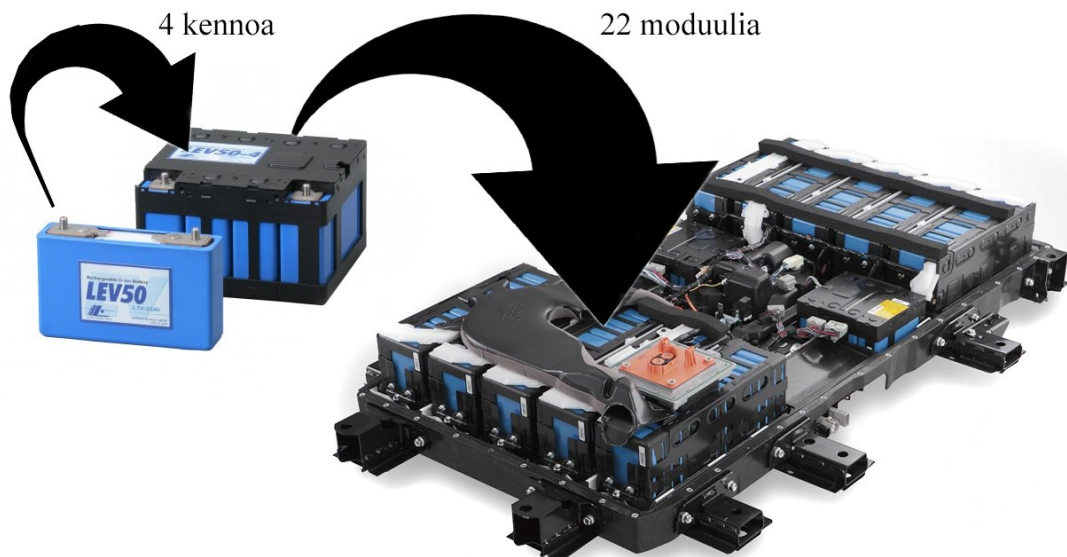
## 2. Menetelmät

### 2.1 Ajoneuvoissa käytettävät akkutyypit

Ajoneuvoakkuina on käytetty pääasiassa kolmea eri akkutyyppiä. 1990-luvulle asti kaupallisissa sähköautoissa käytettiin lähinnä lyijyakkuja edullisen hinnan ja hyvän saatavuuden vuoksi. Lyijyakkujen ongelmana on heikko energiatiheys ja sen aiheuttama suuri massa. Lyijyakuilla on myös heikko syklinen kesto, erityisesti jos suuri osa akun kapasiteetista käytetään toistuvasti. Vuonna 1997 julkaistu ensimmäinen hybridi-auto, Toyota Prius, käytti sähköisessä voimalinjassa nikkelimetallihydridiakkua. Nikkelimetallihydridi-akun energiatiheys on lyijyakkua suurempi ja se kestää syklistä kuormitusta (purkulaus) lyijyakkua paremmin.

2000-luvun alkupuolella yleistynyt litiumioniakku on nykyisin eniten käytetty akkutyyppi myös hybridi- ja sähköautoissa. Aiemmin ajoneuvoissa käytettyjen nikkelimetallihydridiakkujen osuus on jäänyt litiumioniakkujen pienemmäksi jo 2010-luvun alkupuolella. Nykyisin nikkelimetallihydridiakkua käytetään vain muutamissa pienikapasiteetisissa hybridi-autoissa.

Litiumioniakut ovat jo aiemmin saavuttaneet hallitsevan aseman kuluttajaelektroniikan akkuina. Sähkö- ja hybridi-autojen ajoakut ovat kuitenkin valtavasti kuluttajaelektroniikkaa suurempia. Kuvassa 1 on esitetty Mitsubishi i-MiEV – sähköauton 16,3 kWh kokois-akuston rakenne. Vertailun vuoksi esimerkiksi Teslan 85 kWh akku sisältää 7 104 kennoa, Nissan Leafin 24 kWh akku 192 kennoa ja Chevrolet Voltin 16,5 kWh akku 288 kennoa (Elkind, 2014). Esimerkiksi tavallisen kannettavan tietokoneen akku sisältää tyypillisesti noin kuusi Teslan akuston kennoa vastaavaa 18650-sylinterikennoa.



*Kuva 1: Mitsubishi i-MiEV:n akuston rakenne, yhteensä 88 kennoa ja 16,3 kWh kokonaiskapasiteetti. (Muokattu kuva: Markus Markkanen)*

Kuluttajanäkökulmasta poiketen litiumioniakuilla tarkoitetaan suurta määrää erilaisia akkukemioita, joiden yhdistävänä tekijänä on akuissa käytetty ionimuotoinen litium ( $\text{Li}^+$ ) (Mikolajczak et al., 2011). Litiumin vuosituotannosta noin 22–33 prosenttia käytetään akkuteollisuuden tarpeisiin. Varsinkin vanhemmat litiumioniakut sisältävät myös suuren määrän arvokasta kobolttia (Rombach et al., 2014).

Vuonna 2011 litiumioniakkujen markkina kasvoi 20 prosentin vuosivauhtia. Aiemmin käytettyihin akkuteknologioihin verrattuna kasvu on suurta. Esimerkiksi nikkelimetallihydridiakkujen markkinatilanne on pysynyt samana, ja nikkelikadmiumakkujen kysyntä on samaan aikaan laskenut 16 prosenttia. (Mikolajczak, 2011)

Erityisesti ajoneuvoteollisuuden odotetaan kasvattavan litiumioniakkujen markkinoiden kokoa vuosina 2010–2020 (Linden et al., 2011, s. 26.1). Teslan käynnissä olevan rakennusprojektin, Gigafactoryn, tavoitteena on tuottaa vuositasolla 35 GWh litiumioniakkuja. Tämä vastaa koko vuoden 2013 maailmanlaajuisia litiumioniakkutuotantoa. (Tesla Motors, 2014) Kuvassa 2 esitetty Teslan Model S –malli on vuoden 2016 suorituskykyisimpiä sähköautoja sekä voimalinjaltaan että akkukapasiteetiltaan.



*Kuva 2: Tesla Model S -malli käyttää 60-90 kWh litiumioniakkua. (Kuva: Markus Markkanen)*

Taulukosta 1 voidaan havaita, että litiumioniakun selkeimpänä etuna ajoneuvokäyttöä ajatellen on sen korkea energiatiheys painoon ja tilavuuteen nähden, jolloin akuston massaa ja ulkomittoja voidaan pienentää. Näin ajoneuvon sisätiloja ja yhdellä latauksella saavutettavaa ajomatkaa voidaan kasvattaa. Ajoneuvon pienempi kokonaismassa tarkoittaa myös ajoneuvon pienempää energiankulutusta, joka lisää kantamaa entisestään.

*Taulukko 1: Ajoakkuina käytettyjen akkutyyppeiden ominaisuuksia (Linden et al., 2011). C on normalisoitu virta, eli 1 C tarkoittaa akun koko kapasiteetin purkamista tunnin aikana.*

Akkutyyppi	Litiumioni	Nikkelimetallihydridi	Lyijy
Energiatiheys (Wh/kg)	130–240	63–75	25
Jännite per kenno (V)	3,3–3,7	1,2	2,0
Purkuvirta	3–30 C	3 C	4 C
Syklinen kesto	500+	600–1200	200–700
Edut	-Energiatiheys -Jännite -Suuri purkuvirta	-Syklinen kesto -Kestoikä -Turvallinen	-Edullinen -Kierrätettävyys
Heikkoudet	-Kallis -Turvallisuus	-Energiatiheys -Muisti-ilmiö	-Energiatiheys -Syklinen kesto

Yksi sähköautojen ongelmista on autossa käytetyn akuston kestoikä, jonka pituudesta on esitetty monenlaisia arvioita. Arviointia vaikeuttaa se, että akuston käyttötavalla ja ympäristön lämpötilalla on suuri vaikutus sen käyttöikään. Akun vaihtamistarpeen ratkaisee lopulta auton ja akuston käyttöikä, sekä auton aiempi käyttösuorite. (Neubauer et al. 2015)

Uuden akuston vaihto käytettyyn autoon voi kuitenkin olla taloudellisesti kannattamatonta, sillä akuston arvon osuus auton arvosta on suuri. Esimerkiksi Mercedes-Benzin ja Audin ladattavien hybridimallien akustojen hinta on varaosana noin 10–15 tuhatta euroa. Alemman keskiluokan autojen, kuten Audi A3:n, polttomoottoria käyttävien mallien hinta laskee pelkän akuston hinnan tasolle noin 5–8 vuodessa. Suomessa akunvaihtoa koskevat ongelmat saattavat korostua, sillä autojen keskimääräinen käyttöikä on jonkin verran eurooppalaista keskiarvoa pidempi. Tämä saattaa kuitenkin kompensoitua akkujen pidemmällä käyttöiällä viileässä ilmastossa.

On kuitenkin epätodennäköistä, että auton omistaja joutuisi vaihtamaan akuston ajoneuvon takuun ollessa voimassa. Kirjoitushetkellä ajoakuille myönnetään selkeästi pidempi takuu, kuin koko autolle. Poikkeuksena tähän saattaisivat olla selkeät akustoon kohdistuneet fyysiset vauriot, suojausten ohitus tai esimerkiksi käyttöohjeiden akun lataamista ja ylläpitoa koskevien ohjeiden noudattamatta jättäminen. Korkealla myyntihinnalla valmistaja voi ehkäistä akkujen myyntiä erilaiseen rakentelukäyttöön, mikä pienentää autonvalmistajan riskejä.

Sähkö- ja hybridautoissa käytettäviä ajoakkuja ei ole kirjoitushetkellä standardoitu. Eri autonvalmistajat käyttävät erityyppisiä kennoja akustoissaan. On mahdollista, etteivät autonvalmistajat halua standardoida akkuja, sillä tämän voidaan ajatella heikentävän kilpailukykyä. Selkeästi muita paremman akkukonstruktion kehittävä autonvalmistaja saa merkittävän kilpailuedun muihin valmistajiin nähden, mikäli akkukonstruktioita onnistutaan käyttämään yksinoikeudella.

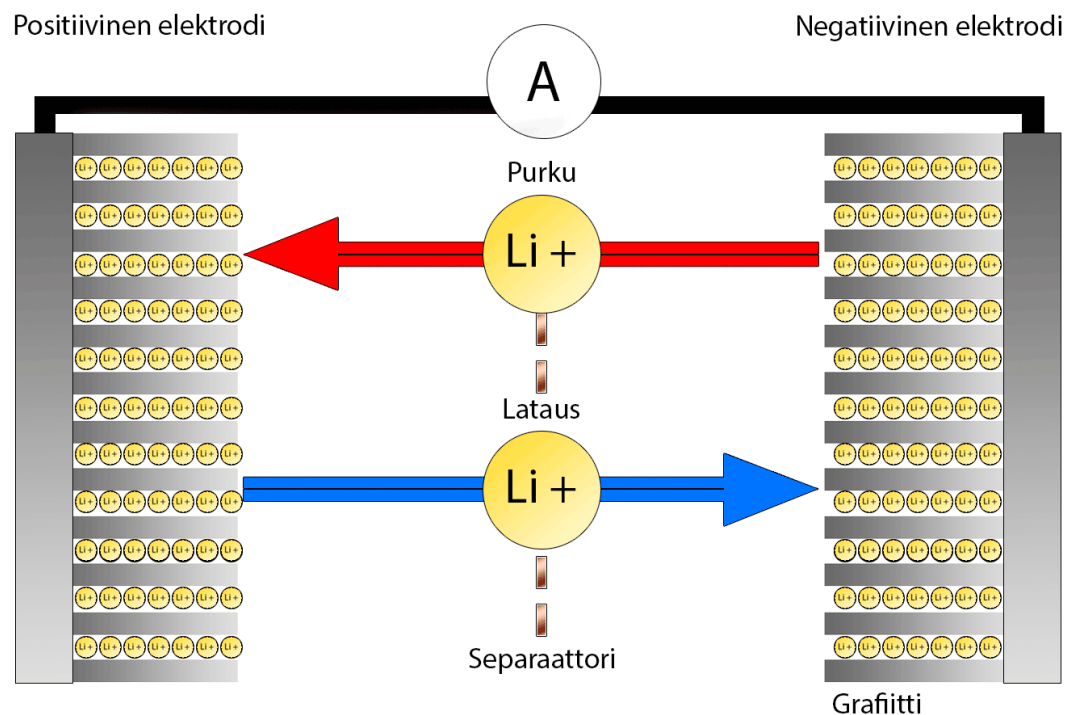
Standardoinnin puute hankaloittaa kuitenkin merkittävästi akkujen kiertotaloutta. Ongelmia aiheutuu esimerkiksi akkujen erilaisista jännitetasoista, akunhallintajärjestelmistä, kiinnityksistä, fyysisestä koosta, liitännöistä ja eroavista akkukemioista. Kiertotalouden haasteita voitaisiinkin helpottaa merkittävästi jo akustojen suunnitteluvaiheessa.

Erityyppisiä ajoneuvoakkuihin liittyviä standardeja on jo kuitenkin kehitetty. Näitä ovat esimerkiksi akuston kestoajan testaamiseen liittyvä SAE:n standardi J2288, akkujen suorituskyvyn ja keston testaamiseen liittyvä ISO-standardi 12405, litiumioniakkujen turvallisuustekijöihin ja minimiturvallisuustasoon liittyvä SAE:n standardi J2929 sekä sähkö- ja hybridautojen turvallisuuteen liittyvä SAE:n standardi J2344. Lisäksi useita ajoakkuihin liittyviä standardeja on kehitteillä. Yhtenä tärkeimmistä voitaisiin pitää yleiseen akkupaketin suunnitteluun liittyvää SAE:n standardia J1797.

### 2.1.1 Litiumioniakut

Litiumioniakku koostuu positiivisesta (katodi) ja negatiivisesta (anodi) elektrodista, separaattorista sekä elektrolyytistä. Separattori on kalvo, joka estää katodin ja anodin fyysisen kosketuksen. Elektrolyytin tehtävänä on mahdollistaa litiumionien siirtyminen. Akkua sähköisesti purettaessa litiumionit siirtyvät anodin rakenteesta katodin rakenteeseen. Lataustilanteessa litiumionit virtaavat vastakkaiseen suuntaan, katodista anodille. Kuvassa 3 esitetään akun rakenne ja litiumionien liikkuminen lataus- ja purkutilanteissa.

Tyypillinen litiumioniakku tarjoaa 3,7 V nimellispännitteen sekä noin 150–200 mAh/g kapasiteetin. Lisäksi tehokäyttöön suunniteltujen litiumioniakkujen purkuvirta voi olla useita kymmeniä kertoja akun kapasiteetin kokoinen. (Linden et al., 2011, s. 26.2.2)



Kuva 3: Litiumionien siirtyminen akun rakenteessa purku- ja lataustilanteessa. (Kuva: Markus Markkanen)

#### Positiivisen elektrodin rakenne

Yleisin positiivisen elektrodin, eli katodin, materiaali on litiumkobolttidioksidi ( $\text{LiCoO}_2$ ), jolla saavutetaan kohtalaisen hyvä energiatiheys. Materiaalin haittapuolina ovat kobolttin kallis hinta, heikko saatavuus sekä joitakin uudempia materiaaleja heikompi turvallisuus. (Linden et al., 2011, s. 26.2.2)

Lisäksi positiivisena elektrodina käytetään erilaisia sekaoksia, joista yleisimpinä esimerkkeinä NMC ( $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$ ) ja NCA ( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ ). NMC tarjoaa vas-

taavan suorituskyvyn kuin litiumkobolttioksidi, mutta sen valmistusmateriaalit ovat huomattavasti edullisemmat, siinä on vähemmän kobolttia ja se on stabiilimpi väärinkäyttötilanteissa. NCA sisältää litiumkobolttioksidin tavoin arvokasta kobolttia, mutta huomattavasti vähemmän. Se tarjoaa parhaimmillaan yli 20 prosenttia suuremman kapasiteetin kuin litiumkobolttioksidi, mutta kennon jännite jää 0,2 V matalammaksi. (Linden et.al., 2011, s. 26.2.2)

Litiumrautaosfaatti ( $\text{LiFePO}_4$ ) on erittäin turvallinen katodimateriaali, mutta sen valmistaminen on kallista, ja energiatiheys on muita materiaaleja selkeästi huonompi. Litiummangaanioksidi ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) on edullinen ja turvallisempi kuin yleisesti käytetty litiumkobolttioksidi. Tällä hetkellä se on kuitenkin epästabiili korkeissa lämpötiloissa, joten se ei ole vielä yleisessä käytössä. (Linden et.al., 2011, s. 26.2.2)

Katodimateriaalit voivat reagoida elektrolyytin kanssa lämpöä tuottavasti, joka aiheuttaa turvallisuusongelman akkukennolle. Eri materiaalien turvallisuutta on yritetty selvittää useissa tutkimuksissa, joiden perusteella katodin reaktio elektrolyytin kanssa alkaa eri materiaaleilla 130–250 celsiusasteen välissä. (Mikolajczak et al., 2011)

### **Negatiivisen elektrodin rakenne**

Negatiivisen elektrodin, eli anodin, materiaali on yleensä grafiittimuotoista hiiltä. Toisena anodimateriaalina käytetään huomattavasti parempaa syklistä kestoa tarjoavaa litiumtitanaattia ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ). Etuna on myös grafiittia parempi tehoteho, eli korkeampi saavutettava lataus- ja purkuvirta. Litiumtitanaatin ongelmana on kuitenkin grafiittia korkeampi potentiaali, jolloin saavutettava kennon jännite on tyypillisesti 1,5 V alhaisempi. Grafiitti tarjoaa täten litiumtitanaattia huomattavasti suuremman energiatheyden. (Linden et.al., 2011, s. 26.2.3)

1970-luvun lopussa tutkittiin laajalti metallisen litiumin käyttöä anodimateriaalina. Hyvää suorituskykyä tarjoavan metallisen litiumin käyttö ei kuitenkaan ollut tarpeeksi turvallista kuluttajakäyttöön. Nykyisissä kuluttaja-akuissa litium sitoutuu grafiitin hilarakenteeseen. Grafiitin rakenteella on suuri vaikutus sen elektrokemiallisiin ominaisuuksiin, kuten litiumin sitomiskykyyn ja potentiaaliin. (Linden et.al., 2011, s. 26.2.3)

Myös piistä ja germaniumista valmistettuja anodeja on käytetty kokeissa. Anodin tarkka materiaali ja pinnoitusprosessi ovat usein yrityssalaisuuksia, sillä anodilla on suuri vaikutus kennon kapasiteettiin, purkuvirtaan ja vanhenemiseen. Anodin pintakerroksen vioittuminen voi johtaa kennon hajoamiseen ja ylikuumenemiseen. (Mikolajczak et al., 2011)



## Elektrolyytti

Elektrolyytinä litiumioniakuissa käytetään ei-vesipohjaisia liuottimia, sillä metallinen litium reagoi voimakkaasti veden kanssa muodostaen herkästi syttyvää vetyä sekä litiumhydroksidia. Orgaanisen elektrolyytin vuoksi akussa voidaan käyttää myös suurempaa jänniteväliä. (Mikolajczak et al., 2011 s.86)

Yksi litiumioniakkujen turvallisuusongelmista on herkästi syttyvä elektrolyytti. Elektrolyytin viskositeetin alentamiseksi käytetään esimerkiksi dimetyylikarbonaattia ( $C_3H_6O_3$ ), etyyliimetyylikarbonaattia ( $C_4H_8O_3$ ) sekä dietyylikarbonaattia ( $C_5H_{10}O_3$ ), joiden kaikkien leimahduspiste on 16 ja 33 celsiusasteen välillä. (Hess et al., 2015, s.1)

Elektrolyytit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: nestemäisiin- ja geelimäisiin. Nestemäiset elektrolyytit koostuvat litiumsuoloista ja orgaanisista liuottimista. Suurin osa elektrolyyteistä käyttää suolana litiumheksafluorofosfaattia ( $LiPF_6$ ). Sen liuoksen sähköjohtavuus on hyvä ja liuoksella on hyvät turvallisuuteen liittyvät ominaisuudet. Kääntöpuolena litiumheksafluorofosfaatti on suhteellisen arvokasta, ja muodostaa veden kanssa reagoidessaan hyvin haitallista vetyfluoridia. Valmistusvaiheessa olosuhteiden tulee siis olla kuivat. (Linden et.al., 2011, s. 26.2.4)

Geelimäisissä elektrolyyteissä joukkoon sekoitetaan polymeerejä, joilla elektrolyyttiin saavutetaan haluttu jähmeys. Tällöin akkua kutsutaan usein litiumpolymeeriakkuksi (Li-Po). Geelimäinen rakenne pitää akun komponentit paremmin yhdessä, eikä akun vuoto-riski ole yhtä korkea kennon vaurioituessa. (Linden et.al., 2011, s. 26.2.4)

Elektrolyytillä voidaan vaikuttaa akun ominaisuuksiin, esimerkiksi sykliseen kestoon, käyttöikään, ylijännitekeston sekä vakauteen. Elektrolyytti suunnitellaan myös käyttökohteen mukaan, jolloin esimerkiksi alhaiseen käyttölämpötilaan valitaan matalaviskositeettinen elektrolyytti. (Mikolajczak et al., 2011)

## Separaattori

Separaattori on anodin ja katodin välissä oleva kalvo, jonka tehtävänä on eristää negatiivinen ja positiivinen elektrodi sähköisesti. Separaattorin materiaalina käytetään yleensä huokoista polyeteeniä, polypropyleeniä tai näiden yhdistelmää, jonka paksuus on noin 16–40  $\mu m$ . (Linden et.al., 2011, s. 26.4)

Polyeteenin matalan sulamispisteen ansiosta separaattoria voidaan käyttää turvallisuutta lisäävänä kennon lämpösulakkeena. Materiaalien huokoisuus katoaa kennon lämpötilan noustessa 135 celsiusasteeseen (polyeteeni) tai 155 celsiusasteeseen (polypropyleeni). Tämä lopettaa litiumionien siirtymisen elektrodilta toiselle, jolloin kenno lakkaa toimimasta pysyvästi. (Linden et.al., 2011, s. 26.4)

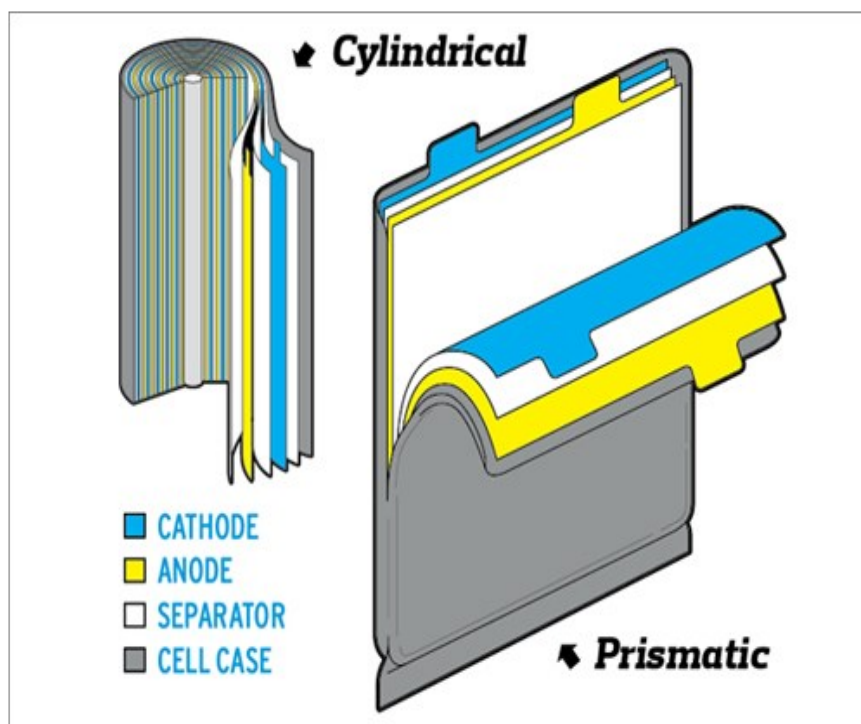
Separaattorin paksuudella, huokoisuudella, lujuudella ja resistanssilla voidaan vaikuttaa akun ominaisuuksiin. Separaattorin ohentaminen jättää enemmän tilaa elektrodeille ja lisää akkukennon kapasiteettia, mutta samalla riski kennon vaurioitumiseen kasvaa. (Mikolajczak et al., 2011)

## Kotelointi

Litiumioniakkuja voidaan rakentaa erilaisiin muotoihin. Eniten käytettyjä muotoja ovat sylinteri (esimerkiksi 18650 –akku) ja erilaiset särmiöt. Kuvassa 4 esitetään eri kerrosten sijainti ja rakenne sylinterin ja särmiön mallisissa kennoissa. Sylinterin mallisilla akuilla numeromerkintä tulee akun mitoista. Esimerkiksi 18650-akku tarkoittaa sylinterin 18 mm ulkohalkaisijaa ja 65 mm pituutta. (Mikolajczak et al., 2011 s.18)

Sylinterin mallisen koteloinnin käyttäminen lisää kennon paineenkestoa ja turvallisuutta. Sylinteriä käytetään muotona myös useissa paineastioissa. Vikaantumistilanteessa kennon sisälle kertyvä paine ei purkaudu yhtä herkästi sen ulkopuolelle ja aiheuta vaaratilannetta. Tilankäytöltään sylinterin malliset kennot ovat kuitenkin muun mallisia kennoja huonompia, sillä monikennoisessa akustossa kennojen väliin jää huomattavasti enemmän hukkatilaa.

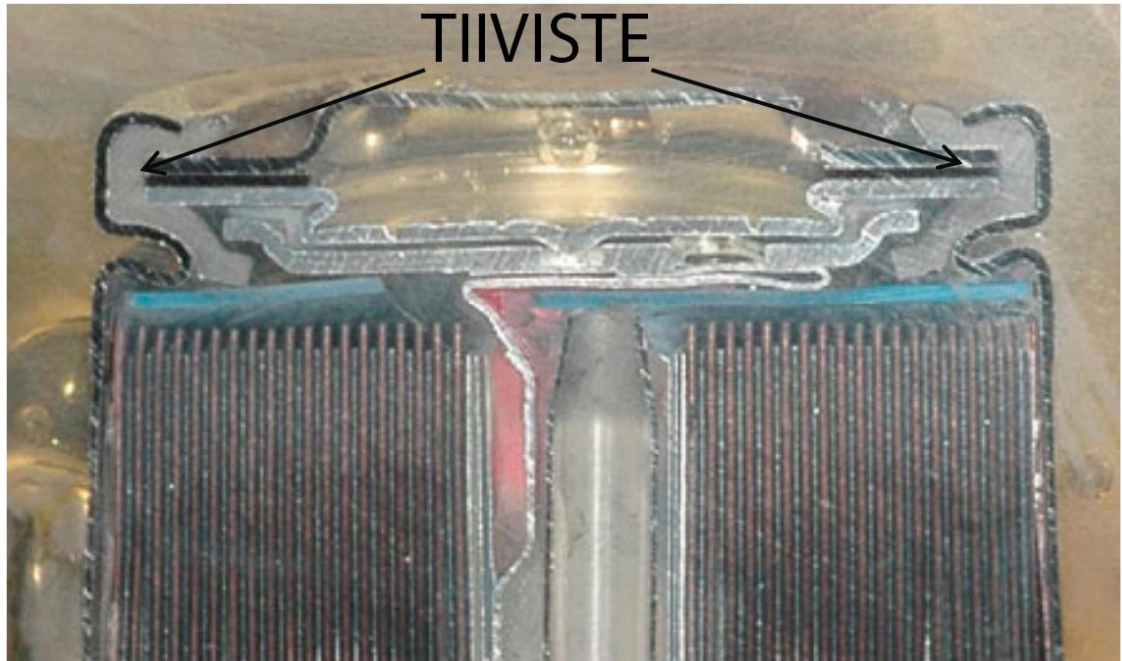
Särmiön mallisia akkuja voidaan pakata myös foliopussiin, jolloin akkukennolla ei ole erillistä kovaa kuorta. Tällöin käytetty elektrolyytti on tyypillisesti geelimuotoista. (Linden et.al., 2011, s. 26.4)



Kuva 4: Rakennekuva ja eri kerrokset sylinterin ja särmiön mallisissa kennoissa. (Car and Driver, 2011)

Sylinterin mallisia akkuja käytetään esimerkiksi kannettavissa tietokoneissa, Tesla-sähköautossa ja kuluttajille myytävissä litiumioniakuissa. Särmiön mallisia akkuja käytetään esimerkiksi matkapuhelimissa ja Chevrolet Volt –sähköauton akustossa. Foliopussiin pakattuja akkuja käytetään esimerkiksi matkapuhelimissa ja kauko-ohjattavissa lennokeissa tilansäästön sekä keveyden vuoksi. Myös Nissan on päättänyt Leaf-sähköautossaan foliopussiakkuihin. (Elkind, 2014)

Sylinterin mallisissa akuissa rakenne suljetaan yleensä tiivisteellä, jonka sijainti on esitetty kuvassa 5. Särmiön malliset akut suljetaan yleensä laserhitsauksen avulla. (Mikolajczak et al., 2011 s.19)



*Kuva 5: Poikkileikkaus 18650-kennosta ja tiivistepinnan sijainti. (Mikolajczak et al., 2011 s.19)*

### 2.1.2 Akkuvarusteet

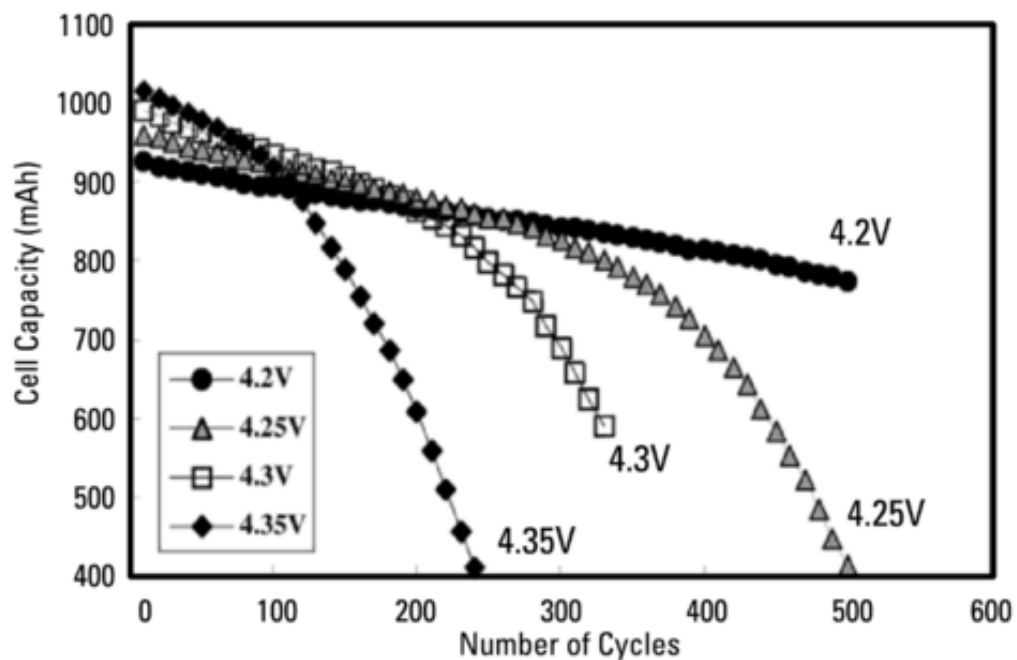
Yksittäisen litiumioniakun kennon jännitteen ollessa noin 3,7 V ajoneuvokäyttöön tarvittava korkea satojen volttien jännite muodostetaan sarjaan kytketyillä kennoilla. Erot sarjaan kytkettyjen kennojen jännitteissä aiheuttavat eroja kennojen sisäiseen resistanssiin ja varaukseen sekä lisäävät kennojen kulumista. (Ugle et al., 2011) Lisäksi monikennoinen litiumioniakku tarvitsee muita akkutyyppejä monimutkaisemman suojauselektronikan ylilatausta, oikosulkua, ylikuumenemista, liiallista purkautumista ja kennojen välisen tasapainon säilyttämistä varten. Tätä suojauselektronikkaa kutsutaan nimellä akustonvalvontajärjestelmä (Battery Management System, BMS). (Mikolajczak et al., 2011 s.23)

Ajoneuvokäytössä akustot ovat kookkaita, ja ne voivat sisältää tuhansia kennoja, joten niiden sähkö- ja lämpötasapainon hallinta on välttämätöntä. Käytön aikana akkukennojen lämpötila- ja jännite-erot saattavat johtaa akuston suorituskyvyn pienenemiseen jopa neljänneksellä. Ajoneuvojen ajoakkuja ladataan ja puretaan usein, joten kennojen väliset varauserot kasvavat tavallista nopeammin. (Stuart et al., 2002)

Akustonvalvontajärjestelmä ohjaa myös usein akkujen jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmää. Koko akuston lämpötilan hallinta on tärkeää, sillä satojen kilowattien moottoritehot tarkoittavat suurta lämpökuormaa ja jopa yli tuhannen ampeerin hetkellisiä virtoja.

Litiumioniakkujen lataukseen käytetyn jännitteen tulee olla tarkasti oikealla tasolla. Tyyppillinen akkukemia vaatii latausjännitteeksi tarkat 4,2 V. Tätä korkeampi latausjännite laskee akun kapasiteettia huomattavasti pienemmällä syklimäärällä kuvassa 6 esitetyllä tavalla. BMS:n tehtävänä onkin tarkkailla yksittäisten kennojen jännitettä latausvaiheessa, ja estää kennolle vaarallinen ylilataus. (Barsukov et al., 2013, s.52)

Myös matalassa lämpötilassa olevan akun lataaminen on haitallista litiumioniakkujen tapauksessa. Lataaminen johtaa metallisen litiumin kertymiseen anodille, sillä matala lämpötila rajoittaa litiumin diffuusiota elektrodin. (Mikolajczak et al., 2011 s.23)



Kuva 6: Litiumionikennon kapasiteetin lasku syklien funktiona kennon latausjännitteestä riippuen. (Barsukov et al., 2013, s.52)

Metallisen litiumin kertyminen anodille on peruuttamaton prosessi, ja se heikentää kennon kapasiteettia ja suorituskkyä (Battery University, 2016). Pahimmillaan kasvanut kertymä voisi aiheuttaa oikosulun rikkoessaan kennon elektrodien välissä olevan separaattorin kennoon kohdistuvan mekaanisen rasituksen tai värinän yhteydessä. Lisäksi metallinen litium on myös erittäin herkästi reagoiva materiaali, ja se voi aiheuttaa kennon tavallista suuremman syttymisriskin.

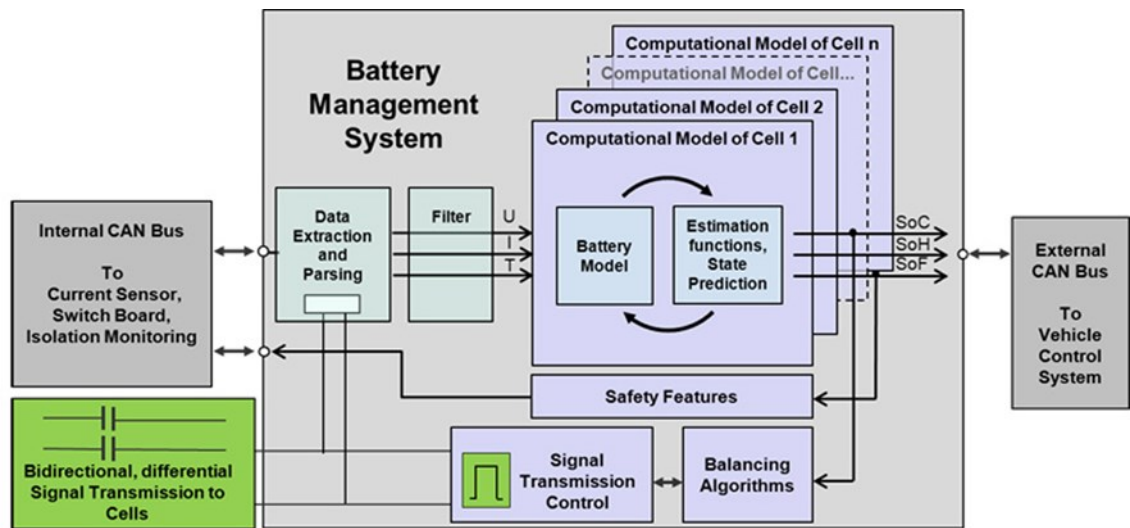
Ajoneuvoakkuja tuleekin lämmittää ennen latausta kylmissä lämpötiloissa. Akkua purettaessa sisäinen resistanssi nostaa kennon lämpötilaa, eikä kylmän akun purkaminen ole kennon kannalta vaarallista. Kylmässä lämpötilassa regeneroivan jarrutuksen puute pienentää kuitenkin auton kantamaa merkittävästi, sillä tällöin hidastettaessa normaalisti talteen saatava liike-energia muutetaan lämmöksi jarrujen avulla.

Liian korkeassa lämpötilassa kennon purkaminen ja lataaminen lisää riskiä merkittävään kennonsisäiseen kaasunmuodostukseen. Tämä voi johtaa kennon turpoamiseen, turvame-

kanismien aktivoitumiseen tai pahimmillaan kennon energiseen hajoamiseen. Litiumioniakkujen akustonvalvontajärjestelmä sisältääkin usein eston liian kylmässä tai kuumassa tapahtuvaan lataamiseen. (Mikolajczak et al., 2011 s.23)

Suuri epätasapaino kennojen varauksen välillä voi tarkoittaa rikkoutunutta kennoa. Monikkennoisten akkujen turvamekanismit pyrkivät tunnistamaan rikkoutuneet kennot ja poistamaan ne käytöstä, mikäli yksittäisen kennon epätasapaino kasvaa liian suureksi. (Mikolajczak et al., 2011 s.24)

Akustohallintajärjestelmät ovat jatkuvan kehitystyön kohteena. Kuvassa 7 esitetään saksalaisen Fraunhoferin ajoneuvokäyttöön tarkoitetun akunhallintajärjestelmän kaavio-kuva. Ajoneuvon CAN-väylän kanssa kommunikoivan järjestelmän ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi akun suorituskyvyn ja terveydentilan seuranta, galvaanisen erotuksen tarkkailu sekä sulakkeen ohjaus vikatilanteessa. (Fraunhofer, 2016)



Kuva 7. Kaaviokuva Fraunhoferin suunnittelemasta akunhallintajärjestelmästä. (Fraunhofer, 2016)

### 2.1.3 Sähköautojen ja akkujen määrä

Sähköautojen myyntimäärät ovat kasvaneet huomattavasti viime vuosina. Vuonna 2011 ladattavien hybridien ja täyssähköautojen myynti kasvoi 729 prosenttia uusien mallien tultua markkinoille. Tämän jälkeen kasvu on hidastunut, mutta myyntimäärät ovat edelleen jatkuvassa kasvussa. Vuonna 2014 myyntimäärät nousivat 53 prosenttia noin 300 000 autoyksilöön. (IEA, 2015)

Myyntimäärän suurta kasvua selittävät teknologian ja automallien kehittymisen lisäksi myös sähköautoille annetut tuet. Näihin kuuluvat esimerkiksi verohelpotukset, valtion tuet auton ostohinnasta ja pidemmällä aikavälillä auton ostohinnasta takaisin maksettu energiatuki (IEA, 2013). Joissakin maissa sähköautoilla saa lisäksi käyttää busseille ja takseille tarkoitettuja kaistoja sekä pysäköidä ilmaiseksi.

Ladattavien hybridien ja täyssähköautojen kokonaismäärä maailmassa oli yli 665 000 yksilöä vuonna 2014 (IEA, 2015). Vuoden 2015 syyskuun loppuun mennessä määrä oli noussut jo miljoonaan yksilöön (ICCT, 2015). Suosituimpien sähköautojen koostetut kumulatiiviset myyntimäärät on listattu taulukossa 2.

*Taulukko 2. Suosituimpien täyssähköautojen maailmanlaajuinen kumulatiivinen myyntimäärä.*

<b>Malli</b>	<b>Kumulatiivinen myynti</b>
Nissan Leaf (24 kWh)	200 000 (Automotive World, 2016)
Tesla Model S (60-90 kWh)	107 000 (Tesla Motors, 2016a)
Mitsubishi i-MiEV (16 kWh)	50 000 (Hybridcars, 2015)
Renault Zoe	50 000 (Renault, 2016)
BMW i3	40 109 (BMW, 2015, 2016)
Yhteensä	447 109

Yhdysvallat on kirjoitushetkellä selkeästi maailman suurin sähköautojen markkina. Yhdysvalloissa oli käytössä vuonna 2014 ladattavia hybridiautoja ja täyssähköautoja yhteensä noin 275 000 kappaletta. Tämä oli kokonaisuudessaan 39 prosenttia maailman sähköautokannasta. Yhdysvalloissa myydyistä uusista autoista noin 1,5 prosenttia oli sähköautoja tai ladattavia hybridiautoja. (IEA, 2015)

Uusista autoista myytävien sähköautojen ja ladattavien hybridien osuus oli suurin Norjassa, jossa uusia niitä myytiin vuonna 2014 noin 12,5 prosenttia uusista autoista. Norjan ladattavien hybridien ja sähköautojen kokonaismäärä oli vuonna 2014 maan kokoon nähden suuret 40 887 yksilöä. (IEA, 2015)

Sähköautojen määrän kasvu on ollut nopeaa myös Suomessa malliston ja valikoiman laajentuessa. Suomessa täyssähkö- ja hybridiautojen matalista hiilidioksidipäästöistä johtuva muita autoja pienempi autoveroprosentti kompensoi autojen kalliita valmistuskustannuksia. Kirjoitushetkellä ilmiö on selkeimmin huomattavissa ladattavien hybridien

hinnoittelussa. Taulukon 3 esimerkkihinnoittelusta nähdään, että autojen veroton myyntihinta on selkeästi polttomoottoreita käyttävää mallistoa kalliimpi, mutta vastaavasti autoveron osuus jää tyypillisesti vain muutamaan tuhanteen euroon.

*Taulukko 3. Mitsubishi Outlander –katumaasturin eri voimalinjojen hinnoittelu Instyle Navi –varustetasolla. (Mitsubishi, 2016)*

<b>Mitsubishi Outlander</b>	<b>Autoveroton hinta (euroa, sis. ALV)</b>	<b>Kokonaishinta (euroa)</b>	<b>Autoveron osuus</b>
2.0 Benssiini	34 016	44 990	32 %
2.2 Diesel	37 309	49 995	34 %
Plug-in Hybrid	52 024	55 990	7,6 %

Suomessa myytiin vuosina 2012 ja 2013 yhteensä 439 sähköautoa sisältäen ladattavat hybridit ja täyssähköautot. Myyntimäärä kaksinkertaistui vuonna 2014, ja vuonna 2015 kasvua oli vielä 50 prosenttia. Kasvun suuruudessa näkyy erityisesti yritys- ja leasingkäyttöön myydyt autot valtion sähkö- ja hybridiautoille tarjoamien energiatukien ansiosta.

Sähkö- ja hybridiautojen osuus Suomen automyynnistä on kuitenkin verrattain pieni kokonaisyntymäärään verrattuna. Suomessa myytyjen sähkö- ja hybridiautojen tarkemmat vuosittaiset myyntimäärät esitetään taulukossa 4. Ennen vuotta 2012 rekisteröityjen autojen voimalinjaa ei ole eritelty Trafín tilastoissa. Henkilöautoja ensirekisteröidään Suomessa vuositason keskimäärin hieman yli 100 000 kappaletta, joten hieman yli 3 prosenttia ensirekisteröidyistä autoista on sähkö- tai hybridikäyttöisiä.

*Taulukko 4. Sähköä käyttävien henkilöautojen rekisteröintimäärät Suomessa, (Trafi, 2016)*

<b>Vuosi</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
Täyssähköautot	-	51	50	183	243
Ladattavat hybridit	-	128	168	257	414
Hybridit	1135	1365	2254	2304	2855
Yhteensä	1135	1544	2472	2744	3512

Vaikka myyntimäärissä verrattuna tavallisia hybridiautoja myydään yli kymmenkertaisesti täyssähköautoihin verrattuna, akustojen koossa on selkeä ero autotyyppien välillä. Tavallisen hybridiauton akkukapasiteetti on tyypillisesti 1-2 kilowattituntia, ladattavalla hybridillä noin 4-12 kilowattituntia ja täyssähköautolla muutamasta kymmenestä lähes sataan kilowattituntiin. Yhden täyssähköauton akusto on kapasiteetiltaan kymmen-satakertainen tavalliseen hybridiin verrattuna. Tämän seurauksena akkujätettä syntyy huomattavasti enemmän täyssähköautoista kuin pieniakkuisista hybrideistä, myyntimäärän suuresta erosta huolimatta.

Taulukossa 5 on esitetty Suomessa vuosina 2013 eniten myytyjä ladattavia sähköautoja sekä niiden akuston koko. Ensirekisteröintien perusteella voidaan arvioida keskimääräinen vuositason syntynä akkujätteen määrä kertomalla ensirekisteröintien määrä keskimääräisellä akkukapasiteetilla.

*Taulukko 5. Yksittäisten automallien ensirekisteröinnit Suomessa ja niiden akustojen koko. (Trafi, 2016)*

<b>Malli</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
Tesla Model S (60–90 kWh)	2	94	146
Nissan Leaf (24 kWh)	41	79	64
Mitsubishi i-MiEV (16 kWh)	4	2	0
Ford Focus Electric (23 kWh)	2	4	0
Citroën C-Zero (16 kWh)	1	0	0
Volkswagen E-Up! (18 kWh)	0	4	7
Mitsubishi Outlander PHEV (12 kWh)	35	146	103
Opel Ampera (16–16,5 kWh)	17	17	0
Toyota Prius Plug-in (4,4 kWh)	45	21	11
Volvo V60 Plug-in (12 kWh)	66	51	15
Porsche Panamera S E-Hybrid (9,4 kWh)	0	12	9
Tavalliset hybridautot (1-2 kWh)	2254	2304	2855

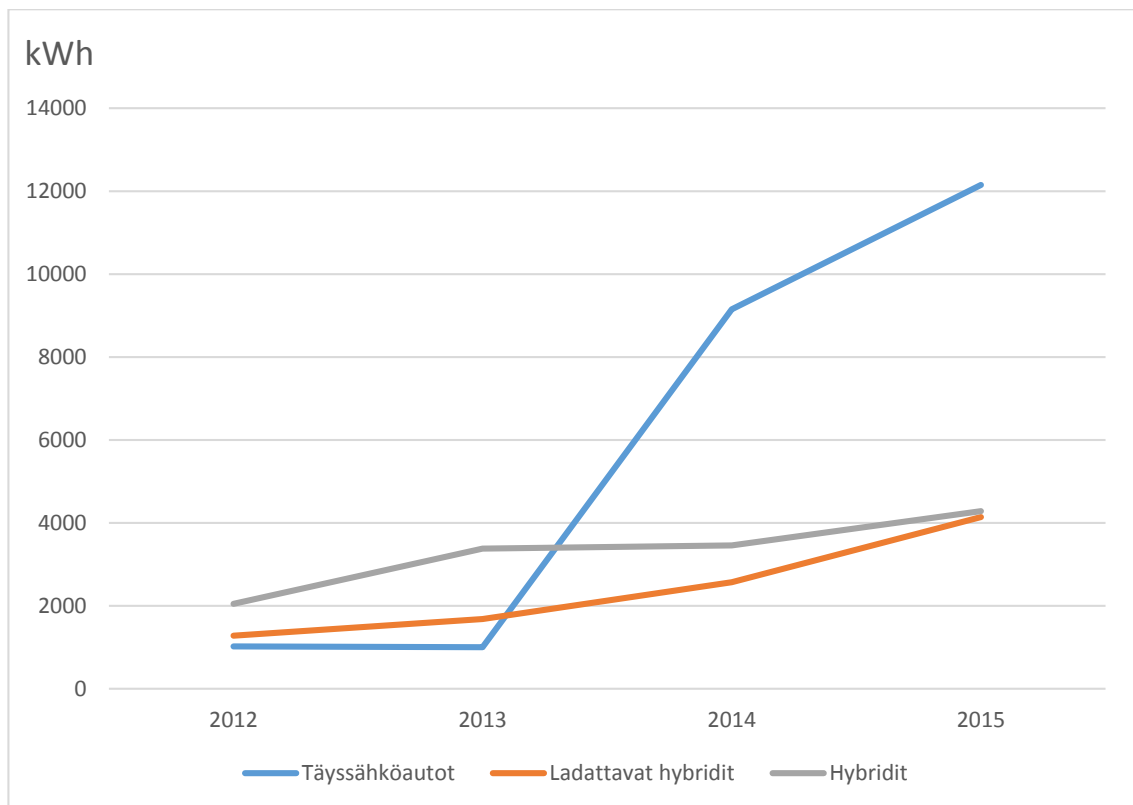
Taulukosta 5 nähdään, että Tesla Model S oli täyssähköautoista myyntimäärältään selkeästi suurin vuonna 2015. Teslan suuri myyntimäärä tarkoittaa myös huomattavasti suurempaa keskimääräistä akkukapasiteettia automallin myynnin alettua vuonna 2014. Täyssähköautojen keskimääräisenä akkukapasiteettina voidaan pitää eri autojen myyntimäärien ja kapasiteettien perusteella ennen vuotta 2014 noin 20 kWh ja vuodesta 2014 eteenpäin noin 50 kWh. Tämän perusteella vuonna 2015 myydyistä täyssähköautoista kertyi kapasiteettia noin 12 150 kWh.

Ladattavien hybridien puolella myytyjen autojen keskimääräinen akkukapasiteetti on noin 10 kWh. Tämän perusteella Suomessa myytävistä autoista kertyi vuonna 2015 kapasiteettia noin 4 140 kWh. Myydyn akkukapasiteetin määrä on kaksinkertaistunut vuodesta 2013.



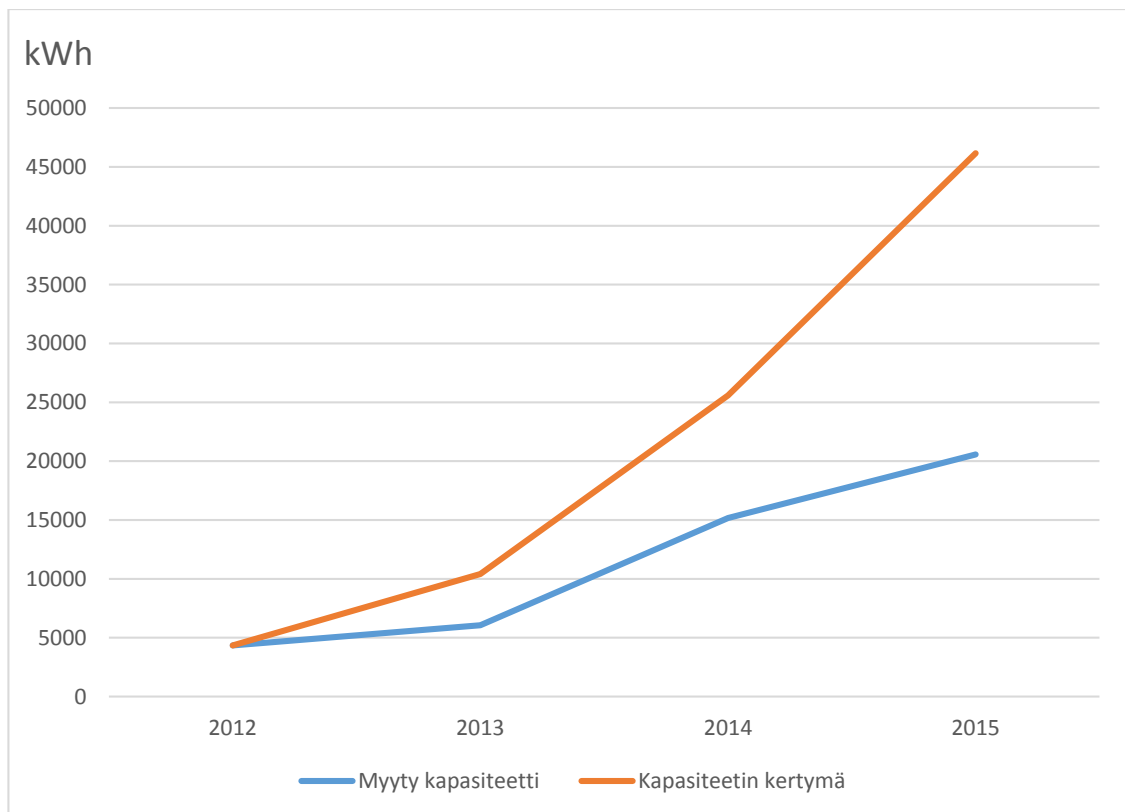
Tavallisten hybridautojen akkukapasiteetti jää keskimäärin matalaksi, noin 1-2 kWh. Huomattavasti suuremmista myyntimääristä johtuen myydyistä hybridautoista kertyy hieman enemmän akkukapasiteettia kuin ladattavista hybrideistä. Vuonna 2015 ensirekisteröityjen autojen akkukapasiteetti 1,5 kWh keskiarvolla oli yhteensä noin 4 280 kWh.

Kuvasta 8 voidaan päätellä, että suurikapasiteettisten täyssähköautojen yleistyminen vaikuttaa myytyyn akkukapasiteettiin ja tulevaisuudessa kertyvään akkujätteeseen huomattavasti enemmän kuin ladattavat ja tavalliset hybridautot.



*Kuva 8: Arvio Suomessa myytyjen ajoneuvoakkujen kokonaiskapasiteetista.*

Kuvasta 9 nähdään, että vuosina 2013–2014 akkukapasiteetin myyntimäärässä oli voimakasta kasvua. Suurimpana syynä tähän on suurikapasiteettinen Teslan Model S -malli, jonka myynti oli jopa puolet Suomen täyssähköautoista sen julkaisun jälkeen vuonna 2014. Vuonna 2015 kasvua oli edelleen, mutta se oli edellisvuotta hitaampaa. Kasvun hidastumiseen on voinut vaikuttaa esimerkiksi energiatukien loppuminen, jolloin sähköauton leasingsopimus tulee huomattavasti aiempaa kalliimmaksi. Vuotta 2012 vanhemman kapasiteetin arviointi on vaikeaa, sillä Trafi ei julkaise aiemmilta ajanjaksoilta autotyypeittäin eriteltyjä tilastoja.



*Kuva 9: Arvio Suomessa myytyjen ajoneuvoakkujen kapasiteetin kertymästä.*

Suomessa vuonna 2015 myydyistä sähköautoakuista kertyi kapasiteettiä arvion mukaan hieman yli 20 MWh. Nykyisillä akkujen noin 200 €/kWh valmistuskustannuksilla vuosimyynti arvoiksi tulee noin 4 miljoonaa euroa. Uusien akkujen varaosahintojen perusteella arvioituna markkinoiden arvo voi kuitenkin kasvaa kymmeneen miljooniin euroihin.

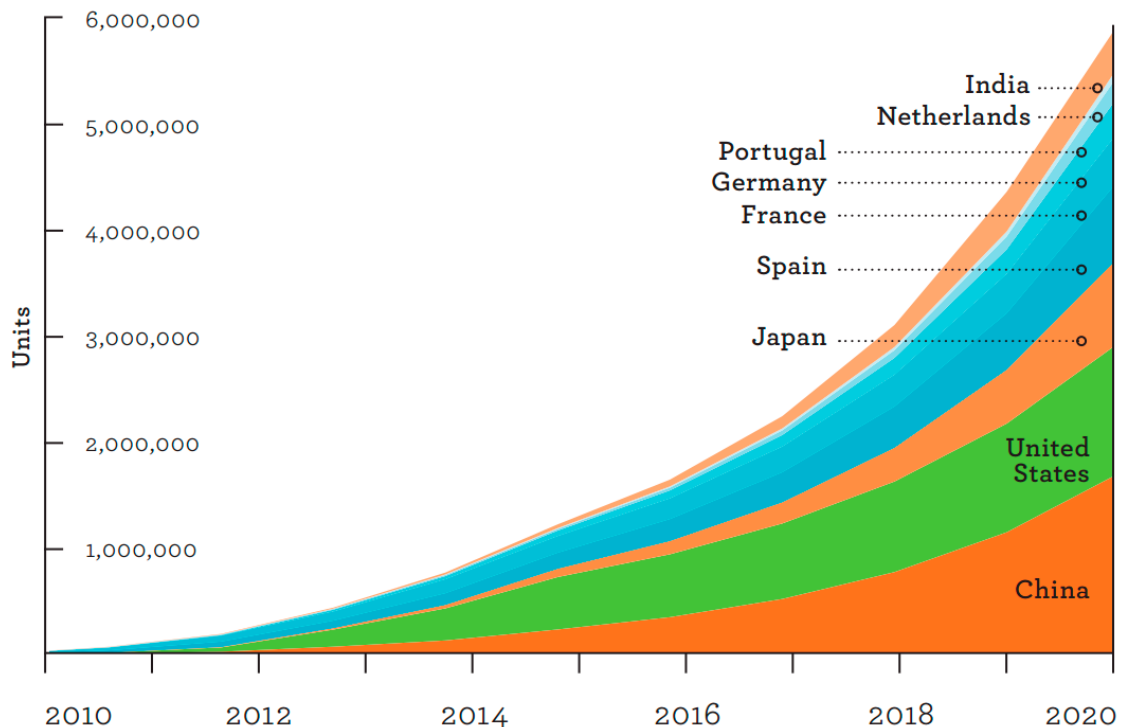
Käytettyjen akkujen arvo laskee kapasiteetin ja suorituskyvyn pienentyessä, ja lisäksi myös uusien akkujen valmistuskustannukset pienenevät tulevaisuudessa. Tätä kompensoi kuitenkin markkinoiden koon odotettu voimakas kasvu. Tällä hetkellä myytyjen sähkö- ja hybridautojen akut poistuvat käytöstä kuitenkin vasta vuoden 2030 tienoilla, jolloin akkumarkkinoiden arvossa voi olla tapahtunut merkittäviä muutoksia.

## 2.1.4 Tulevaisuuden ennusteet

Täyssähköautojen ja ladattavien hybridi-autojen myynnin odotetaan kasvavan nopeasti tulevaisuudessa, kuten IEA:n julkaisemassa kuvassa 10 ennustetaan. Vuonna 2016 IEA:n mukainen myyntitavoite on 1,7 miljoonaa kappaletta ja vuonna 2020 jo 5,9 miljoonaa kappaletta (IEA, 2013).

Konsulttiyritys Frost & Sullivanin esittämän arvion perusteella ajoneuvoakkujen kokonaismäärä nousee markkinoiden kasvaessa 7-8 kertaiseksi vuosina 2013–2020. IEA:n tavoitteen mukaan sähköajoneuvojen myynti kasvaa kuvan 10 mukaisesti 12-kertaiseksi samalla aikavälillä. (Sapru, 2014, Neubauer et al., 2015) Esitettyjen arvioiden perusteella voidaan olettaa, että tulevaisuudessa poistuvan akkujätteen määrä tulee kasvamaan moninkertaiseksi kuluvan vuosikymmenen aikana.

Vastaavasti käytöstä poistuvien (EOL) autojen määrän oletetaan ylittävän 100 miljoonaa yksilöä vuonna 2020 (Tian et al., 2013). Tällöin ennusteiden ja myyntitavoitteiden mukaisesti uusia täyssähköautoja ja ladattavia hybridi-autoja myytäisiin noin 3,5-6 prosenttia käytöstä poistuvien autojen määrästä.



Kuva 10: Sähköautojen myyntitavoitteet vuoteen 2020 saakka. (IEA, 2013)

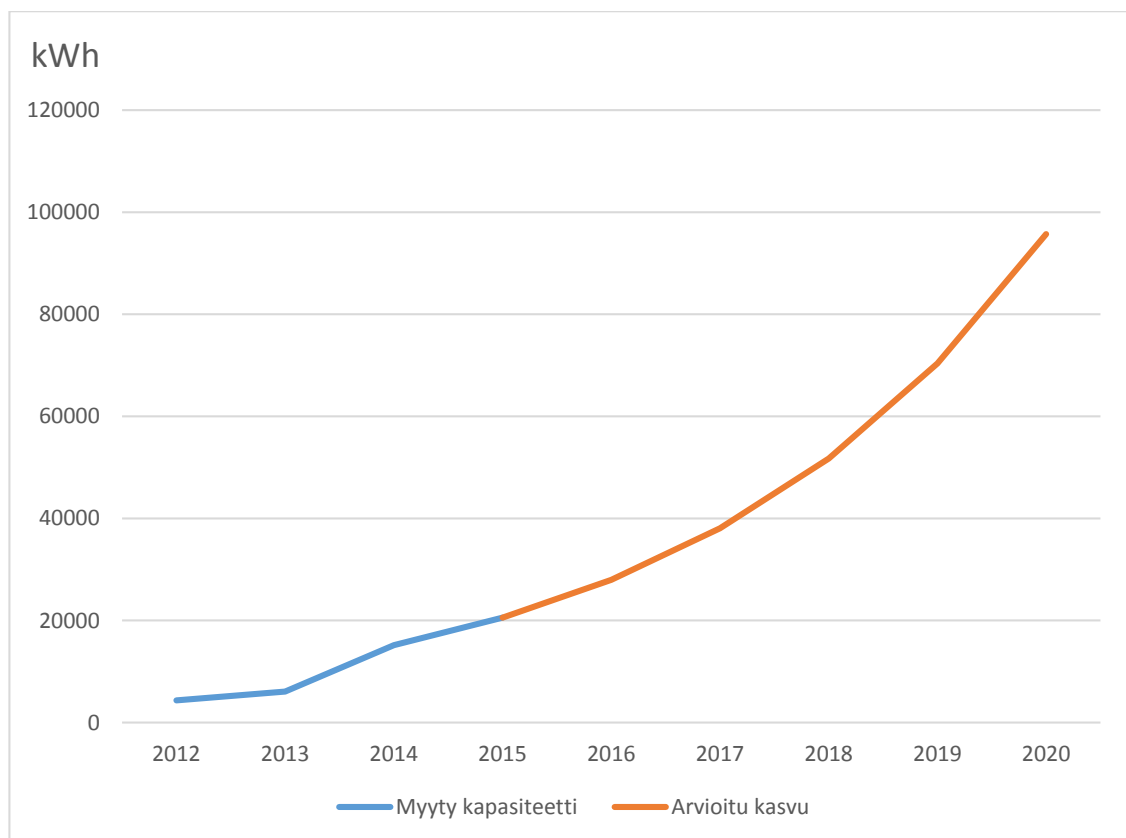
Todelliset myyntimäärät ovat kuitenkin selkeästi myyntitavoitteita jäljessä. Vuonna 2013 IEA:n ennusteen mukainen myyntitavoite oli 0,5 miljoonaa kappaletta, ja toteutunut myynti noin 0,2 miljoonaa kappaletta. Vuoden 2014 myyntitavoite kasvoi lähes 0,9 miljoonaan kappaleeseen, mutta toteutunut myyntimäärä oli 0,3 miljoonaa kappaletta (IEA, 2013 & 2015)

Myyntimäärät ovat joka tapauksessa yksilömäärillä ja varsinkin myydyin akkukapasiteetin mukaan laskettuna voimakkaassa kasvussa. Kasvun myötä myös ajoneuvokäytöstä

poistuvan akkujätteen määrä on voimakkaassa nousussa. Suurin osa ajoneuvoakuista tulee päätymään kierrätykseen tai uusiokäyttöön akun poistuessa käytöstä noin 15 vuoden iässä (Neubauer et al., 2015).

Vuonna 2013 ajoneuvoakkujen osuus oli 18,3 prosenttia litiumioniakkujen markkinoista. Vuoteen 2020 mennessä määrän uskotaan nousevan 30 prosenttiin. Samalla litiumioniakkujen kokonaismarkkinoiden uskotaan kasvavan noin 20–25 prosentin vuosivauhdilla. (Sapru, 2014)

Kuvassa 11 arvioidaan Suomen sähkö- ja hybridautojen akkumarkkinoiden kasvua. Vuosien 2012–2015 välillä vuosikasvu on ollut minimissään noin 36 prosenttia vuosina 2014–2015. Tämän pienimmän kasvun perusteella arvioituna vuosittain myydyn akkukapasiteetin koko lähestyisi noin 100 000 kWh vuonna 2020. Tällöin Suomen sähkö- ja hybridautojen akkumarkkinoiden vuosittainen myyntiarvo olisi noin 20 miljoonaa euroa nykyisillä 200 €/kWh valmistuskustannuksilla laskettuna. Akkujen varaosahinnoilla laskettuna arvo voi nousta yli 100 miljoonan euron. Koko maailman mittakaavassa sähkö- ja hybridautojen kierrätyksen markkina-arvon arvioidaan kasvavan yli 2 miljardin euron vuoteen 2022 mennessä (Jawad, 2010, s.53).



*Kuva 11: Suomen akkumarkkinoiden kasvun ennuste 36 prosentin vuosikasvun perusteella*

Tulevaisuuden myyntimäärien ennustaminen on kuitenkin hyvin haastavaa. Esimerkiksi vuoden 2016 aikana myytiin tuleva suurella akkukapasiteetilla varustettu Tesla Model X -katumaasturi saattaa nostaa myydyin akkukapasiteetin määrää sähköautojen valikoidun laajentuessa eri ajoneuvosegmentteihin. Näin tapahtui viimeksi Tesla Model S:n tapauksessa vuonna 2014. Katumaastureiden suosio maailmalla on ollut erityisen suurta viime vuosien aikana.

Akkujen oletettu käyttöikä ajoneuvokäytössä on noin 8-15 vuotta, joten ajoakkujen kierrätyksen markkinoiden kasvua joudutaan odottamaan vielä seuraaville vuosikymmenille. Tällä hetkellä myytävien akkujen käytöstä poisto ajoittuu todennäköisesti vuosille 2024–2030.

Sähköautojen läpilyöntiä markkinoilla on kuitenkin odotettu myös aiemmin, viimeksi 1990-luvulla. Vaikka tämän päivän sähköautojen teknologia on selkeästi kehittyneempää esimerkiksi mukavuuslaitteiden ja akkujen kantaman osalta, lataukseen ja toimintasäteen liittyvät ongelmat ovat yhä esillä. Nämä ongelmat korostuvat kylmissä sääolosuhteissa, kuten Suomen talvessa.

Sähköautojen markkinoiden kasvusta on esitetty myös huomattavasti kriittisempiä arvioita. Öljyalan järjestö OPEC:in mukaan täyssähköautojen määrän oletetaan kasvavan henkilöautopuolella vain 6 prosenttiin vuoteen 2040 mennessä. Hybridiautojen markkinaosuuden oletetaan kasvavan prosentista 14 prosenttiin samalla aikavälillä. (Ban et al., 2015)

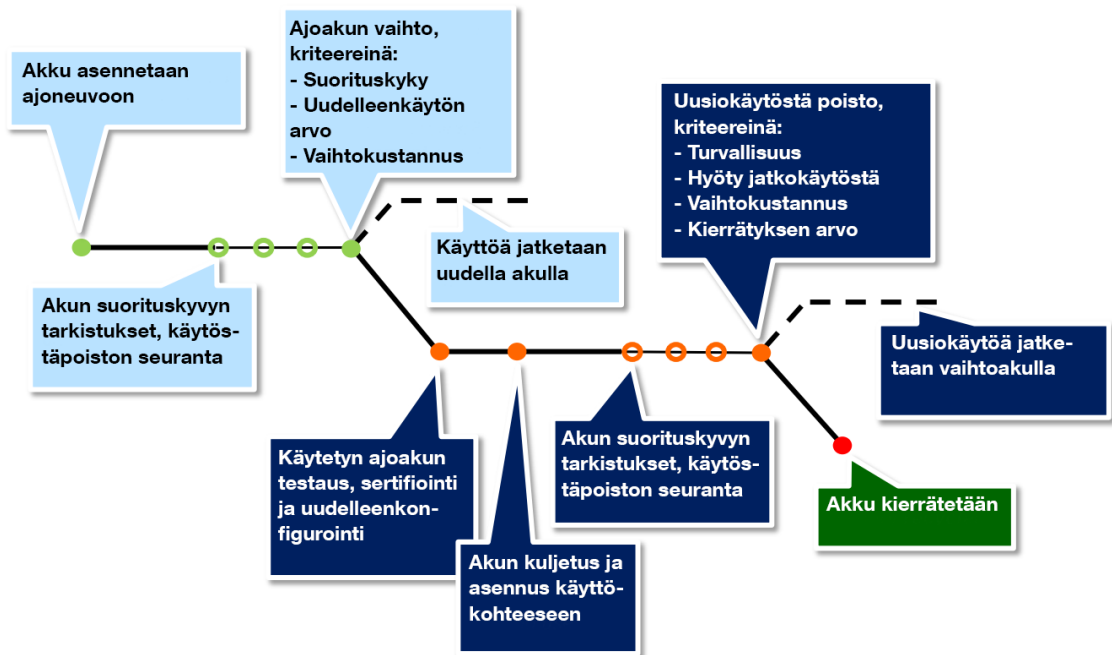
On myös mahdollista, että erilaisten sähköautoille annettujen veroetujen ja tukien poistussa tai vähentyessä myös sähköautojen myynnin kasvu hiipuu. Tämä voi aiheuttaa reiluja muutoksia myyntimäärissä kasvutavoitteisiin verrattuna.

Tällä hetkellä sähköautoja tuetaan matalammalla verotuksella, eikä ajamiseen käytetyn sähkön hintaan sisälly polttoaineita vastaavaa vero-osuutta. Ajoneuvot ja liikkuminen ovat kuitenkin olleet myös Suomen valtiolle hyvin merkittävä verotuskohde. Vuonna 2014 valtion verotulot liikenteestä olivat 7,9 miljardia euroa, joista polttoaineiden verotuksen osuus oli noin 4,2 miljardia euroa (Autoalan tiedotuskeskus, 2015). Mikäli sähköautojen osuus autokannasta nousisi merkittävästi, on mahdollista, että sähköautojen verotusta kiristettäisiin vastaavien verotulojen saamiseksi. Tämä taas laskisi sähköauton hankinnan ja käytön taloudellista kannattavuutta.

Suhteessa kalliimpi ostohinta, huomattavasti ongelmallisempi pitkien matkojen matkustus sekä sähköautojen käyttökustannuksen nousu saattaisi laskea sähköautojen suosiota selvästi, mikäli valmistuskustannuksiin ja akkuteknologiaan ei saada merkittäviä parannuksia.

## 2.2 Akkujen ajoneuvokäytöstä poisto

Ajoneuvoakkujen uudelleenkäytön kannalta on ratkaisevaa tietää, mikä on akuston todellinen käyttöikä ajoneuvokäytössä (Neubauer et al., 2015). Kuvassa 12 esitetään ajoakun vaihdon kriteereitä ajoneuvokäytössä ja uudelleenkäytössä sekä hahmotellaan tapahtumien aikajanaa.



Kuva 12: Suomennettu mahdollinen aikajana ajoakkujen käytöstä poistolle ja jatkokäytölle. (Neubauer et al., 2010)

Akun kuntoa ja suorituskykyä seurataan ajoneuvokäytön aikana, ja uusiokäyttöön siirtymisen jälkeen ajoneuvon käyttöä voidaan jatkaa uudella tai kunnostetulla akulla. Ennen uusiokäyttöä käytetty ajoakku tarkistetaan ja testataan sekä muutetaan uuteen käyttökohteen sopivaksi. Akun kunnon ja suorituskyvyn seurantaa jatketaan uusiokäytössä, josta akku siirretään elinkaarensa lopussa kierrätettäväksi.

### Akuston kunnon määrittäminen

Akun vaihtoajankohdan määrittelemiseksi on tärkeää tietää akuston käyttöikä ja kunto (SOH). Autonvalmistajan takuuehdoissa määritellään usein raja-arvot akuston suorituskyvylle, jolloin vaihtotarpeen määrittely näiden puitteissa on yksinkertaista. Sama koskee leasing-autoja, joissa auton omistava leasingyhtiö vastaa auton toimintakunnosta. (Neubauer et al., 2015 s.2)

Esimerkiksi vuoden 2014 Chevrolet Voltin takuuehdoissa akuston luvataan säilyttävän Yhdysvalloissa vähintään 70 prosenttia kapasiteetistaan 8 vuoden ja 100 000 mailin takuuajana. (Chevrolet, 2013)

Takuuajan päättymisen jälkeen akun vaihtoajankohdan kriteerit muuttuvat. Akun hinnan osuus käytetyn auton hinnasta on hyvin huomattava, ladattavissa noin 10 kWh kapasiteetilla varustetuissa hybrideissäkin jopa yli 10 000 euroa. Akun vaihto ei välttämättä ole auton omistajan kannalta taloudellisesti kannattavaa.

Uuden akun vaikutus auton ominaisuuksiin voi kuitenkin olla vaihdon kannalta ratkaisevaa. Auton käyttäjän kannalta positiivisia ominaisuuksia ovat uuden akun antama parempi kiihtyvyys, pidempi toimintamatka, pienentyneet kilometrikustannukset ja ajoneuvon parempi jälleenmyyntiarvo (Neubauer et al., 2015).

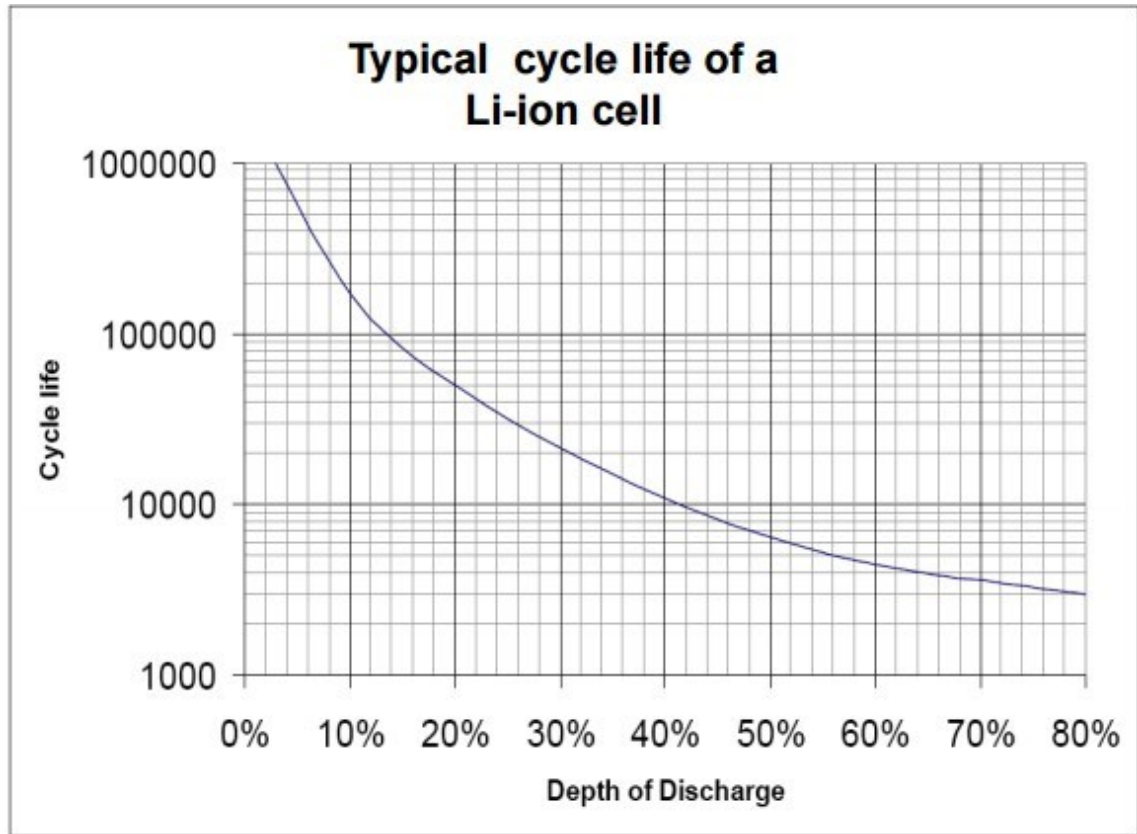
Ajoneuvoakut tullaan todennäköisimmin vaihtamaan joko takuuajana valmistajan toimesta, tai silloin, kun se on loppukäyttäjälle taloudellisesti järkevää. Jälkimmäisen ehdon täytyminen on kuitenkin epätodennäköistä, jos auton käyttöikäsi lasketaan 15 vuotta, ellei auton käyttö ja käyttöympäristö ole ollut erityisen kuormittavaa (Neubauer et al., 2015).

Suomessa auton keskimääräinen käyttöikä on tällä hetkellä noin 20 vuotta. Tällä hetkellä sähkö- ja hybridiautojen myyntiä Suomessa pyritään edistämään useiden muiden maiden tapaan kevyemmällä auto- ja ajoneuvoverolla. Sähköautojen lyhemmältä vaikuttava käyttöikä voi kuitenkin vaikuttaa jälleenmyyntiarvoon, ja sitä kautta uusien sähköautojen houkuttelevuuteen ja myyntimääriin. Toisaalta on mahdollista, että Suomen pohjoisesta sijainnista johtuva viileä ilmasto tarjoaa akustoille keskimääräistä pidemmän käyttöiän.

Akuston todellisen kunnon ja sitä kautta arvon määrittely on haastavaa. 25 prosenttia laskenut kapasiteetti ei välttämättä tarkoita akun arvon laskemista samassa suhteessa. On mahdollista, että akun toimintakyky säilyy hyvänä vielä useita vuosia aiempaa pienemmällä heikkenemisellä. Toisaalta on mahdollista, että akku hajoaa yllättäen vain muutama lataus sykliä myöhemmin. Tämä tekee todellisen arvon määrittämisestä vaikeaa. (Neubauer et al., 2015, s. 4)

Modernit ajoneuvoakut ja niiden akunhallintajärjestelmät pitävät tilastoa akun varauksesta ja lämpötilasta. Akunhallintajärjestelmiä voidaan käyttää akun eliniän määrittämiseen ohjelmistomuutoksilla, ellei ajoneuvon akusto tee sitä jo valmiiksi. SAE:n tekemien simulaatioiden perusteella suurin osa täyssähköauton akun resistanssin kasvusta ja kapasiteetin laskusta johtuu auton ikääntymisestä eikä sen käytöstä. Ladattavien hybridiautojen tapauksessa akun suuremmalla syklimäärällä on kuitenkin ikääntymistä suurempi vaikutus kennojen sisäisen resistanssin kasvuun. (Neubauer et al., 2015, s. 3)

Kuvasta 13 nähdään, että käytetty purkaussyvyys vaikuttaa voimakkaasti myös litiumioniakun sykliseen keston. Akunhallintajärjestelmän tallentaman purkaussyvyyshistorian perusteella voisi olla mahdollista tehdä suuntaa-antavia päätelmiä akun jäljellä olevasta syklisestä iästä.



Kuva 13: Purkaussyvyyden vaikutus akun sykliseen keston. (Battery Bro, 2016)

15 vuoden käyttöiän aikana akuston kapasiteetti laskee ikääntymisen johdosta 25–35 prosenttia (Neubauer et al., 2015 s.4). Ladattavan hybridin akustossa käytöstä johtuva kuluminen on kuitenkin suurempaa sisäisen resistanssin kasvun ja suuremman syklimäärän aiheuttaman kapasiteetin laskun johdosta.(Neubauer et al., 2015 s. 8)

Yhdistettynä ajosyklien ja latausten analysointi, akun elinkaaren lämpötilan seuranta sekä akun varaustilan seuranta voisivat antaa hyvin tarkan arvion akun kunnosta (Neubauer et al., 2015 s. 8).

### Akuston vaurioituminen

On mahdollista, että sähkö- tai hybridi-auton akku vaurioituu esimerkiksi kolarin, liian pitkän säilytyksen tai akulle soveltumattomien käyttöolosuhteiden johdosta. Esimerkiksi Tesla Model S:n käyttöohjeiden mukaan auto tulee aina kytkeä latauspistokkeeseen, erityisesti jos sitä ei käytetä muutamien viikkojen aikana. Itsepurkautuminen, auton elektronikan ja akunhallintajärjestelmän kuluttama virta voi purkaa akustoa liiaksi, jolloin on mahdollista, että akku vaurioituu. (Tesla Motors, 2016b)



Käyttöohjeiden noudattamatta jättäminen voi aiheuttaa auton omistajalle huomattavat kustannukset, mikäli akuston turvallista käyttöä ei voida enää valmistajan mukaan taata, ja se tulee vaihtaa uuteen. Teslan tapauksessa akku asettuu suojaustilaan varauksen las-  
kiessa liian alas. Akustolle ei ole välttämättä täten aiheudu todellista vauriota, ja se voi-  
daan vielä mahdollisesti palauttaa käyttöön, mikäli se todetaan turvalliseksi.

Kolaritapauksissa onnettomuuden laadusta ja akuston kunnosta riippuen akuston käyttöä voidaan jatkaa, se voidaan korjata tai se lähetetään kierrätettäväksi. Kolarin aiheuttamat vauriot eivät välttämättä näy akuston ulkokuoressa. Tämä lisää haasteita akun jatkokäyt-  
töä ajatellen.

Kuvan 14 esimerkissä Nissan Leaf -sähköauto on joutunut vakavaan sivukolariin. Autosta puretun akuston ulkokuori on säilynyt onnettomuudessa vauriottomana, ja myös koko akusto on myyty eteenpäin vauriottomana. Todellisuudessa sisäpuolella kennojen oma inertia on aiheuttanut kolarin voimakkaan kiihtyvyyden seurauksena niiden vaurioitumi-  
sen. Akuston ulkokuori on saumattu kiinni tehtaalla, joten sitä ei ole suunniteltu puretta-  
vaksi. Tämä esimerkki valottaa sitä, miten vaikeaa akkuvaurioiden tulkinta voi olla.



*Kuva 14: Kolaroidun Nissan Leafin akusto, vasemmalla vaurioton ulkokuori ja oikealla vauriot akun sisäosassa (Kuva: Jukka Anttonen)*

Vaurioituneet kennot eivät myöskään aiheuttaneet ongelmia ensimmäisillä lataussyk-  
leillä. Myös tämä kertoo haasteista akkujen kunnan analysoinnissa. Akuston heikko fyy-  
sinen kunto ei kerro välittömästi vaarasta tai uusikaan tuote ei takaa olematonta riskiä  
akun käytön kanssa.

Akkujen korkeasta varaosahinnasta johtuen kolarissa vaurioitunut sähköauton tai ladatta-  
van hybridin akusto tarkoittaa suurimmassa osassa tapauksista auton lunastusta vakuu-  
tusyhtiölle. Akuston vaihto voi yli kaksinkertaistaa auton korjauskustannukset, vaikka  
auton peltivauriot olisivat mittavat.

Lisäksi korkea jälleenmyyntiarvo saattaa aiheuttaa ongelmia käytettyjen akkujen mark-  
kinoilla. Akuston todellisen kunnan selvittäminen on haastavaa loppukäyttäjälle, joten  
vaurioituneiden ja mahdollisesti vaarallisten akkujen myynti saattaa olla saavutettavan  
taloudellisen hyödyn vuoksi houkuttelevaa.

### 2.2.1 Akkujen uudelleenkäyttö

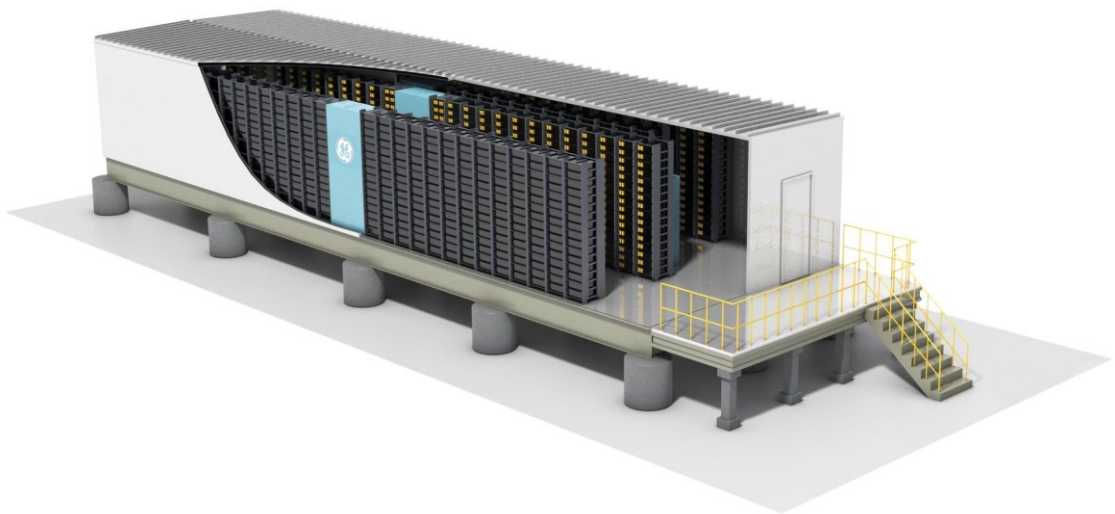
Akkujen hinnan osuus sähköauton voimalinjasta on noin 81 prosenttia, joten akkujen uudelleenkäyttöön kohdistuu merkittäviä taloudellisia intressejä (Huynh et al., 2014). Uudelleenkäytön avulla akkujen kokonaiskäyttöikää voitaisiin pidentää merkittävästi. Tämä auttaisi pienentämään ajoneuvon ostajalle akustosta koituvia kuluja. (Neubauer et al. 2010)

Vuonna 2013 litiumioniakkujen markkinoiden liikevaihdosta 6,9 prosenttia saatiin sähköverkon varastona toimivista akustoista. Vuoteen 2020 mennessä määrän arvioidaan kasvavan 37,6 prosenttiin, mikä tarkoittaa ajoneuvokäyttöä suurempaa osuutta. (Sapru, 2014)

Tämä siitäkin huolimatta, että litiumioniakut ovat tällä hetkellä yksi kalleimmista menetelmistä sähköenergian varastointiin. Arvion mukaan litiumioniakkujen valmistuskustannukset lähestyvät myös minimiään, ja hinnan oletetaan laskevan enää maksimissaan 30 prosenttia tulevina vuosina. (Hodson, 2015)

Useiden arvioiden mukaan yksi suurimmista litiumioniakkujen käyttökohteista tulevaisuudessa ovat erilaiset sähköverkon ja uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön varastot (Linden et al., 2011, s. 26.6, Sapru, 2014). Sähkövarastot kiinnostavat myös energia-alan isoja toimijoita. Kuvassa 15 esitetään General Electricin näkemys akuilla toteutetusta uusiutuvan energian varastosta.

Ajoneuvokäytöstä poistetuilla akuilla voitaisiin tasata aurinko- ja tuulivoiman säätilanteen ja vuorokaudenajan mukaan vaihtelevaa tuotantoa sekä vuorokaudenajasta riippuvaa sähkönkulutusta. Erityisesti aurinkoenergiassa puolipilvinen sää voi aiheuttaa nopeita muutoksia sähköntuotannossa, joihin voitaisiin reagoida nopeasti akkuja käyttävillä sähkövarastoilla. Tasainen ja helppo kuormitus sekä pieni purkaussyvyys olisivat akuston pitkän kestoajan kannalta ideaaleja.



*Kuva 15: General Electricin näkemys akuilla toteutetusta energiavarastosta. (General Electric, 2016)*

Useita sähkön varastointiin tähtääviä projekteja on aloitettu jo muutamia vuosia sitten. Esimerkiksi vuonna 2012 teollisuuskonserni ABB ilmoitti yhteistyöstään autovalmistaja Nissanin, 4R Energyn ja Sumimoton kanssa. Projektin tavoitteena oli tasata sähköverkon huippukuormitusta Nissan Leafin akkujen uusiokäytön avulla. (ABB, 2012) Myös GM:n ja ABB:n välisestä yhteistyöstä on uutisoitu (General Motors, 2012). Yhteistyöprojektien nykytilasta ei kuitenkaan ole saatavissa tietoa. Tämä voi liittyä projektien loppumiseen tai mahdolliseen tulevaan kaupalliseen julkaisuun.

Jos vuonna 2014 käytössä olevista ajoneuvoakuista voitaisiin uusiokäyttää 50 prosenttia 75 prosentilla alkuperäisestä kapasiteetista, akkuihin saataisiin parhaimmillaan varastoitua 850 MWh sähköenergiaa. Yksi megawattitunti vastaa noin 330 yhdysvaltalaisasunnon tunnin sähkönkulutusta. (Elkind, 2014)

Fingridin tilastojen mukaan Suomen keskimääräinen sähkönkulutus vuonna 2015 oli 9 282 MWh/h (Fingrid, 2016). Täten myös Suomessa vuosittain myydyllä ja tulevaisuudessa uusiokäytetyllä kymmenien tai satojen megawattituntien akkukapasiteetilla voitaisiin taata tärkeimpien kohteiden sähkönsaantia

Yhdysvaltalaisen Sandia-tutkimuslaitoksen mukaan selkeästi suurin taloudellinen hyöty sähköenergian varastoinnissa saavutettaisiin kotitalouksiin asennettavilla akuilla. Akkuja ladattaisiin automaattisesti sähkön hinnan ollessa alhaalla, ja niitä purettaisiin sähkön hinnan ollessa korkealla. (Eyer et al., 2010, s.38)

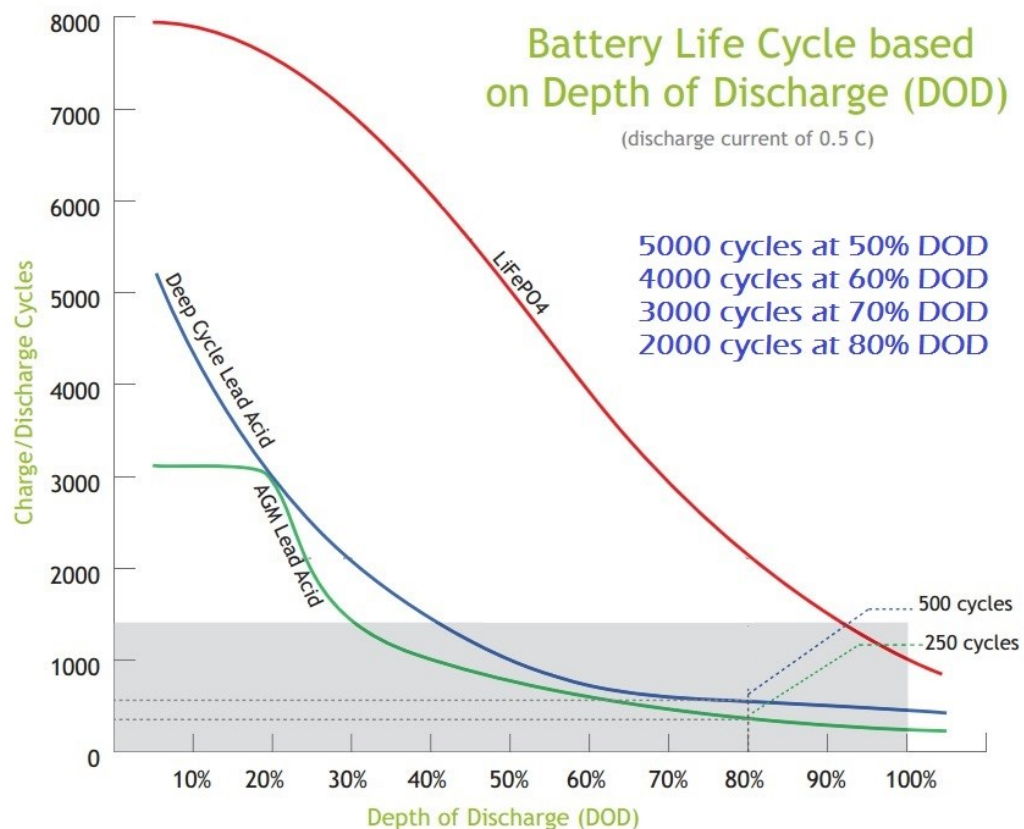
Sähkön saatavuuden muutos ja huippukuormituksen aiheuttamien ongelmien väheneminen saattaisi kuitenkin vaikuttaa sähkön myyntihinnan muodostumiseen. Täten edellä mainitun lataus- ja purkusyklien taloudellinen hyöty voi olla ajateltua pienempi.

Toiseksi kannattavimpana vaihtoehtona ovat kuormituksen tasaus sekä uusiutuvilla energianlähteillä tuotetun sähkön varastointi. Uusiutuvat energianlähteet tuottavat sähköä kausiluontoisesti. Esimerkiksi aurinkokennot toimivat parhaiten aurinkoisella säällä, ja tuulivoima tuottaa sähköä tuulisella säällä. Kuormitus ei kuitenkaan seuraa tuotantoa, jolloin sähköä täytyy varastoida. (Eyer et al., 2010, s.98)

Uusiutuvan energian varastointiin tarvittaisiin kuitenkin runsaasti akkukapasiteettia. Esimerkiksi tuulivoiman tuotanto Suomessa oli vuonna 2015 Fingridin tilastojen mukaan keskimäärin 236 MWh/h maksimin ollessa 818 MWh/h ja minimin ollessa 4 MWh/h. Tuotantomäärässä suurin osa ajasta asettuu keskitason läheisyyteen, ja huipputuotannon kesto on tyypillisesti vuorokaudesta muutamaan vuorokauteen. (Fingrid, 2016)

Yhtenä vaihtoehtona voisi olla kotisähkön varastointi kulutushuippujen tasaamiseksi, mikäli sähkön myynti Suomessa muuttuisi kWh-veloituksesta kWh-paketiksi. Tällöin kotitalous ostaisi sähköä maksimikulutuksen mukaan, ja suuremman kulutuksen tarve voitaisiin tasata kotona sijaitsevalla akustolla. Edellisen kaltainen järjestely helpottaisi sähkön tuotannon tarpeeseen varautumista.

Sähköverkon energiavarastoiksi soveltuvat myös muut akkutyypit. Esimerkiksi varavirtasovelluksissa ja aurinkopaneeleiden yhteydessä on usein käytetty tavallisia lyijyakkuja. Litiumioniakun etuna lyijyakkuun verrattuna on suurempi syklinen kesto suuremmalla purkaussyvyydellä. Kuvassa 16 on nähtävissä suuri ero akkutyypin syklisessä kestossa erityisesti suuremmilla purkaussyvyyksillä. Litiumioniakun hinta kapasiteettia kohden on kuitenkin moninkertainen, ja sen turvallisuusongelmat ovat suurempia. Kertainvestointina litiumioniakku on siis huomattavasti kalliimpi, mutta hintaero tasaantuu käytön aikana.



Kuva 16: Litiumrautafosfaattiakun syklinen kesto kahdentyypiseen lyijyakkuun verrattuna. (Iron Edison, 2016)

Ajoneuvokäytössä litiumioniakun moninkertainen energiatiheys painoon nähden on selkeä etu. Vielä 1990-luvulla myös sähköautojen ajoakkuina käytettiin lyijyakkuja. Kotitalouksissa akuston painolla ei ole vastaavaa merkitystä, ja myös tilankäytölliset ongelmat ovat huomattavasti ajoneuvoja pienempiä. Myös lyijyakkujen markkinat ovat kasvaneet tasaisesti viime vuosikymmeninä, ja niiden arvo on lähes tuplaantunut viimeisen 15 vuoden aikana (Hodson, 2015).

Ajoakkujen hyvästä energia- ja tehotehyydestä johtuen auton akuston moduuleja voitaisiin uusiokäyttää myös pienemmissä ja vähemmän suorituskykyä vaativissa ajoneuvoissa. Näitä voisivat olla esimerkiksi sähkökäyttöiset kevyet nelipyörät (L6e-luokan ajoneuvot), sähkömopot ja -skootterit sekä golfautot.

Uusiokäyttöön siirtymistä voitaisiin helpottaa merkittävästi jo ajoakkujen suunnitteluvaiheessa. Mikäli siirtymiskustannukset halutaan pitää mahdollisimman matalana, ajoakkuja yhtenäistävät standardit helpottaisivat uusiokäyttötoimintaa. Yhtenäistämisen kannalta olennaisia aspekteja voisivat olla esimerkiksi akkujen jännitetasot, liitännät, akunhallintajärjestelmät sekä ulkomitat ja kiinnitykset. Akkujen liitäntöihin kuuluvat sähköliitännän lisäksi esimerkiksi lämmönhallintajärjestelmä ja dataliitäntä.

### Akuston kesto uudessa käyttökohteessa

SAE:n julkaisemien simulaatioiden perusteella uudelleenkäytössä akuston keston kannalta on ratkaisevaa, missä lämpötilassa, ja kuinka suurta kapasiteettia akustosta käytetään. Taulukosta 6 nähdään, että 50 prosentin ja 60 prosentin purkaussyvyyden (DOD) välillä akkujen uusiokäyttöiässä on yli kaksinkertainen ero. (Neubauer et al., 2015, s. 6)

*Taulukko 6: Käytettyjen sähköautojen akkujen simuloitu kestoikä sähköverkon tasauksessa eri puolilla Yhdysvaltoja, suluissa vuoden keskilämpötila. (Neubauer et al. 2015, s. 6)*

Akku (kWh)	DOD	Minneapolis (7,7 C)	Los Angeles (17,3 C)	Phoenix (23,9 C)
Täyssähköauto	50 %	10+ vuotta	10+ vuotta	9,7 vuotta
22,1	60 %	5,5 vuotta	4,0 vuotta	3,6 vuotta
Ladattava hybridi	50 %	9,8 vuotta	8,6 vuotta	8,4 vuotta
7,7	60 %	3,7 vuotta	2,7 vuotta	2,5 vuotta

Jos akuston uusiokäyttökohteena on sähköverkon kulutushuippujen tasaaminen, täyssähköauton akuston voidaan olettaa kestävän oikein käytettynä 15 vuoden ajoneuvokäytön jälkeen vielä yli 10 vuotta uusiokäyttöä. Ladattavan hybridiauton pienempikapasiteettinen akku joutuu sen sijaan ajoneuvokäytön aikana kovemmalle kulutukselle, jolloin kesto uusiokäytössä jää jonkin verran heikommaksi.

Sähköverkon tasauksessa akun kapasiteetin laskulla on huomattavasti suurempi vaikutus akun uudelleenkäytön arvoon. Ajoneuvokäytön aikana täyssähköauton akun kapasiteetin laskuun vaikuttaa eniten akun ikääntyminen sekä ajoneuvon sijainti, eli ulkolämpötila jossa autoa käytetään. (Neubauer et al., 2015, s. 3, s. 8)

## 2.2.2 Akkujen kunnostus

Monikennoisen akuston kennot ikääntyvät eri nopeudella. Tähän voi olla vaikutusta esimerkiksi jäähdytysjärjestelmän suunnittelusta johtuvalla yksittäisten kennojen lämpötilaerolla, kennon poikkeavalla jännitteellä sekä valmistustoleransseilla. Koko akuston kunnon määrittää kuitenkin akun heikoin kenno (Mikolajczak et al., 2011 s.82). Yksittäisiä huonokuntoisia kennoja korjaamalla olisikin mahdollista jatkaa akuston käyttöikää merkittävästi (Huynh, 2014 s.1).

Kunnostuksen haasteena on löytää mahdollisesti tuhansista kennoista koostuvan ajoneuvoakun heikkokuntoisimmat kennot. Nykyisten sähköautojen akustonvalvontajärjestelmät (BMS) tunnistavat todennäköisesti akun varaustilan aluekohtaisia eroja pidemmällä aikavälillä. (Ugle et al., 2011) Tämän avulla tutkinta voitaisiin kaventaa pienempään osaan akkua, joka säästäisi kunnostustoiminnassa todennäköisesti suurimman kustannuksen aiheuttavia henkilötyötunteja.

Yksittäisen kennon kuntoa voidaan arvioida vertaamalla sitä vastaavaan uuteen kennoon. Yhtenä menetelmänä pidetään kennon sisäisen resistanssin ja impedanssin mittausta. Akkua käytettäessä toistuvat lataus- ja purkusykliet kasvattavat kennojen sisäistä resistanssia, joka laskee akusta saatavaa suurinta purkuvirtaa. Eri kennojen välisessä resistanssissa voi kuitenkin olla lähtökohtaisia eroja. Mittauksen ongelmana on herkkyyys mittauserätarkuuksille sekä sisäisen resistanssin laskennallisen mallin onnistuminen (Huynh, 2014 s.2).

Kunnostuksessa jätteen osuus on huomattavasti kierrätystä pienempi, sillä ainoastaan akuston heikkokuntoisimmat kennot vaihdetaan. Koko akuston vaihtoon verrattuna jätettä syntyy huomattavasti vähemmän. Myös kustannukset ovat selkeästi pienemmät, sillä arvokkaita kennoja kuluu vähemmän. Kunnostustoimintaketjun avulla voisi myös purkaa käytöstä poistettujen sähkö- ja hybridiautojen akkuja varaosiksi alan toimijaverkostoon.

Yhdysvaltojen Michiganissa toimiva Global Battery Solutions LLC korjaa ja kunnostaa ajoneuvoakkuja. Yrityksen mukaan akuissa ensimmäisten vuosien aikana ilmenevien elektroniikkavikojen korjaamisella voidaan saavuttaa 90 prosentin kustannussäästö akunvaihtoon verrattuna. Mikäli akusto vaatii kunnostusta kennojen kulumisen vuoksi, kunnostetun akuston avulla voidaan saavuttaa 70 prosentin kustannussäästö. Lopulta ajoneuvokäytöstä poistettu akku voidaan vielä uusiokäyttää uudessa käyttökohteessa. (Global Battery Solutions, 2016)

Kunnostuksen yhteydessä isoja ajoneuvoakkuja voitaisiin myös purkaa pienemmiksi akukupakeiksi. Näiden käyttökohteita voisivat olla esimerkiksi pienemmät ajoneuvot (esim. L6e, matkailuautot, veneet ja sähkömopot) tai kotikäyttöön tarkoitetut sähköön varastointiin soveltuvat akut.

### 2.2.3 Kierrätys

Nykyisissä hybridi- ja sähköajoneuvoissa käytettyjen akkutyypin kierrätys on ollut aiemmin varsin vähäistä. Muun muassa ajoneuvojen käynnistysakkuina käytetyistä lyijyakuista kierrätetään kansainvälisesti noin 98 prosenttia. EU:ssa vuonna 2010 myydyistä litiumioniakuista kierrätettiin kuitenkin vain 5 prosenttia. (Gies, 2015) Pieni kierrätysosuus selittyy suurilta osin kotiin jäävällä kuluttajaelektroniikalla, kuten vanhoilla matkapuhelimilla, kannettavilla tietokoneilla ja sähkötyökaluilla. Kierrätysosuus tulee kuitenkin muuttumaan ajoneuvojen myötä ajoakkujen suuren fyysisen koon vuoksi.

Litiumioniakkujen kierrätys on erityisen haastavaa, sillä akkukemioissa on runsasta vaihtelua eri yritysten ja akkujen välillä. Esimerkiksi eri arvometallien osuudet vaihtelevat, jolloin myös kierrätyksen kannattavuus vaihtelee. Lisäksi kierrätysprosessissa joudutaan ottamaan huomioon erilaiset kemiat, jolloin prosessin tehokkuus todennäköisimmin kärsii. Eri akkukemioiden aiheuttamia haasteita voisi olla mahdollista helpottaa merkitsemiskäytäntöjä muuttamalla. Esimerkiksi muovilaatujen merkintään käytetään selkeää kansainvälistä kierrätysmerkintästandardia. Vastaavaa menetelmään voitaisiin käyttää esimerkiksi koneellisesti luettavan RFID-sirun avulla akkukemioiden merkintään, jolloin kierrätystilanteessa eri kemialla käyttävät akut voitaisiin ohjata koneellisesti eri paikkaan.

Ajoneuvoakkujen kierrätystä koskevat säännöt sisältyvät Euroopan unionin direktiiviin 2006/66/EC. Direktiivissä määritellään kierrätyksen tehokkuudelle raja-arvot akkutyypin mukaan. Lyijy akun raja-arvo on 65 prosenttia, nikkelikadmiumin 75 prosenttia ja muiden akkutyypin (esim. litiumionit) 50 prosenttia. Prosenttiluku lasketaan kierrätykseen saapuvan akun ja saatujen hyötykäytettävien materiaalien massan suhteesta. (Tytgat, 2013)

Nykyisten sähköautojen litiumioniakkujen painosta noin 60 prosenttia tulee itse kennoista, ja noin 40 prosenttia kennoa suojaavista rakenteista, joista suurin osa on metallia. Tyypillisesti metallirakenteet saadaan kierrätettyä lähes 100-prosenttisella tehokkuudella, joka nostaa kierrätyksen kokonaistehokkuutta merkittävästi. (Tytgat, 2013)

Akkukierrätyksessä itse kennoista pääasiassa kierrätetyt materiaalit ovat arvometalleja. Nikkelimetallihydridiakuissa näihin kuuluvat nikkeli, koboltti ja kupari. Akut sisältävät noin 36–42 prosenttia nikkeliä, 22–25 prosenttia rautaa, 8–10 prosenttia harvinaisia maametalleja ja 3–4 prosenttia kobolttia. (Rombach et al., 2014, s. 134, 146) Litiumioniakuissa kierrätyksen taloudellisen kannattavuuden kannalta tärkeimmäksi arvometalliksi muodostuu hankintahinnaltaan kallis koboltti. Uuden kobolttin louhinta on haastavaa, sillä arvometallin tärkein tuottaja on Kongon konfliktialue.

Vanhemmissa litiumioniakuissa kobolttin osuus akussa saattoi olla 18 prosenttia, mutta uudemmissa kennoissa käytettyjen edullisempien katodimateriaalien kierrätys ei ole taloudellisesti yhtä kannattavaa (Gies, 2015). Esimerkiksi litiumrautaosfaattia ja sekaoksia käyttävät katodimateriaalit sisältävät vain hyvin vähän tai eivät ollenkaan kobolttia. Tämä on haitallista kierrätyksen taloudellisen kiinnostavuuden kannalta, sillä kierrätystä harjoitettaisiin pidemmällä aikavälillä vain ekologisesta näkökulmasta (Jawad, 2010, s. 52)

Koboltin tehokas kierrätys on erityisen tärkeää sen pienestä tuottajamäärästä johtuen. Vä-  
häinen raaka-aineiden tuottajien määrä voi aiheuttaa tulevaisuudessa haasteita valmistus-  
kustannuksien kanssa, sillä raaka-aineiden hinnoittelu riippuu voimakkaasti tuottajista.

Tyypillisen litiumkobolttioksidia käyttävän kennon materiaalien massaosuus on esitetty  
taulukossa 7. Eri arvometallien osuus kennossa on yhteensä suurempi kuin käytetyn li-  
tiumkobolttioksidin. Koboltin hinta on kuitenkin noin 24-kertainen alumiiniin verrattuna.  
(Jinqui et al., 2007)

*Taulukko 7: Litiumkobolttioksidikennon materiaalisisältö massaprosenteittain. (Jinqui et al., 2007)*

<b>Materiaali</b>	<b>Osuus (massaprosenttia)</b>
LiCoO <sub>2</sub>	27,5
Teräs ja nikkeli	24,5
Kupari ja alumiini	14,5
Hiili	16
Elektrolyytti	3,5
Polymeerit	14

Vaikka akuissa käytetty litium on teoriassa 100-prosenttisesti kierrätettävissä, sen kierrä-  
tys ei ole tällä hetkellä taloudellisesti kannattavaa (Jawad, 2010, s.52, Rombach et. al.,  
2014 s. 135). Erityisesti sähköautojen määrän voimakkaan kasvun onkin epäilty aiheut-  
tavan väliaikaisia tai pysyviä ongelmia litiumin saatavuuden kannalta (Linden et.al.,  
2011, s. 26.4).

Litiumioniakkujen kierrätys on tärkeää myös turvallisuussyistä. Käytetyt akut sisältävät  
palavia ja myrkyllisiä komponentteja, vaikka niitä ei luokitella vaaralliseksi jätteeksi. Ak-  
kujen sisältämä energia näkyy myös kierrättäessä – muista akkutyypeistä poiketen kennot  
saattavat räjähtää kierrätysprosessissa akkuja jauhettaessa. (Jinqui et al., 2007)

## **Kierrätysprosessit**

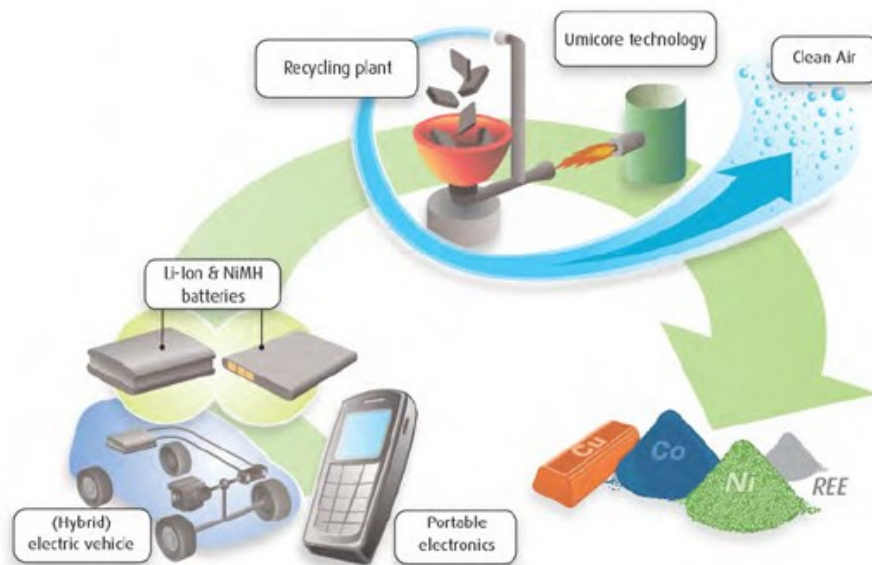
Akkujen kierrätystä varten on olemassa kolme erilaista prosessia: pyrometallurgia, hyd-  
rometallurgia ja osien suora palautus. (Gies, 2015)

Kierrätystä harjoittavat yhtiöt Umicore ja Rhodia kehittivät yhdessä vuonna 2011 pyro-  
metallurgisen prosessin akkujen kierrättämistä varten. Prosessissa esikäsittelemättömät  
akut syötetään hyvin kuumaan sulattoon. Akkujen palamisen luovuttama energia pitää  
sulaton toimintaa yllä. Lämpötila pidetään hyvin korkeana, ettei palavia orgaanisia yhdis-  
teitä tai dioksiineja pääse muodostumaan. Prosessissa muodostuva metallisula jatkokäsi-  
tellään, jolloin saadaan erilaisia koboltti- ja nikkeliyhdisteitä, joita voidaan uusiokäyttää  
akuissa tai muissa käyttökohteissa. (Rombach et. al., 2014 s. 134)



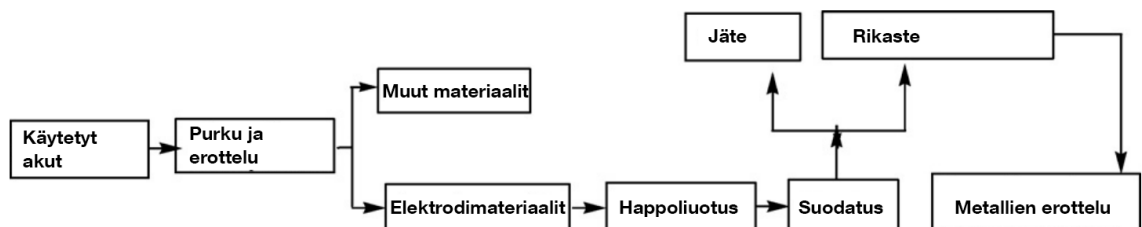
Brysselissä sijaitseva Umicore käyttää akkujen kierrätykseen edellä mainittua pyrometallurgiaa, jonka karkea periaate on esitetty kuvassa 17. Menetelmän avulla litiumioni- ja nikkelimetallihydridiakuista saadaan talteen koboltti, nikkeli ja kupari. Litium ja alumiini päätyvät kuitenkin esimerkiksi rakennusmateriaalien täyteaineeksi. Prosessista saatavien arvometallien myynti ei kuitenkaan ole toiminnan taloudellinen intressi, vaan akkuvalmistajat maksavat yritykselle akkujen kierrätyksestä. (Gies, 2015)

Kiertotalouden näkökulmasta pyrometallurgiaa voitaisiin pitää enemmänkin akkujen hävittämiseen kuin kierrättämiseen soveltuvana menetelmänä. Jätteen poltto energiaksi on kuitenkin yleisesti käytetty prosessi myös muilla aloilla.



Kuva 17: Umicoren käyttämän kierrätysprosessin karkea periaate. (Umicore, 2016)

Hydrometallurgisen prosessin kaavio on esitetty kuvassa 18. Prosessissa akut pilkotaan tai murskataan veteen, josta eri aineet erotellaan niiden kelluvuuden perusteella. Tämän jälkeen veteen lisätään kemikaaleja, jotka reagoivat akun katodimateriaalin kanssa muodostaen helpommin eroteltavia yhdisteitä. Hydrometallurgista prosessia käyttää esimerkiksi Retriev Technologies. (Gies, 2015)



Kuva 18: Hydrometallurgian suomennettu prosessikaavio (Jinqui et al., 2007)

Testausvaiheessa olevassa suorassa palautuksessa (direct recovery) kennon rakennetta ei hajoteta pyrometallurgian ja hydrometallurgian tapaan. Sen sijaan katodin rakenne eheytetään kemiallisessa liuoksessa, jolloin katodia voidaan käyttää uudelleen. Myös kennon alumiinista, muovista ja grafiitista valmistetut komponentit voidaan käyttää uudelleen. Menetelmän etuna ovat matala energiankulutus ja alhaiset kustannukset. (Gies, 2015)

## 2.3 Turvallisuus

### 2.3.1 Akun vikaantuminen

Litiumioniakkujen paloturvallisuus on tullut kuluttajien huomioon matkapuhelinten ja kannettavien tietokoneiden akkuvikojen takia. Esimerkiksi Sony teki vuonna 2006 tulipaloriskin takia takaisinkutsun kuudesta miljoonasta kannettavan tietokoneen akusta (Hodson, 2015).

Riskit ovat mahdollisia myös suuremmassa mittakaavassa. Tammikuussa 2013 tyhjillään ollut Boeing Dreamliner -lentokone syttyi tuleen akkuvian vuoksi (Hodson, 2015). Samat ongelmat koskevat ajoneuvokäyttöä, eivätkä kaikki riskeistä ole aina autonvalmistajan ennakoitavissa. Esimerkiksi erilaiset kolaritilanteet saattavat aiheuttaa hyvin erityyppisiä vaurioita akustolle. Tämä voi aiheuttaa akustolle, ja sitä kautta ajoneuville, tulipaloriskin kolaritilanteen yhteydessä. Akustoon voi jäädä myös piileviä vaurioita, joita ei voida havaita ulkopuolelta. Piilevä vaurio voi ilmentyä vasta myöhemmin käytön jatkuessa.

Käytettyjen akkujen markkinoiden yhteydessä nouseekin monenlaisia vastuukysymyksiä. Akun aiempi käyttöhistoria vaikuttaa akun turvallisuuteen ja suoriutumiseen tulevassa käyttökohteessa. Esimerkiksi käyttöaikanaan huomaamatta vaurioitunut sähköauton akusto saattaa aiheuttaa tulipaloriskin vasta myöhemmin uudessa käyttökohteessaan kotitalouteen asennettuna. Akuston hinnan osuus auton arvosta on suuri, joten kolariautojen akkujen myynti voi olla taloudellisesti hyvin kannattavaa. Markkinoiden muodostumisen ja kehittymisen kannalta olisikin olennaista selvittää, olisiko vastuussa tai korvausvelvollinen esimerkiksi akuston myyjä, ostaja, vakuutusyhtiö vai akuston kunnon tarkistanut taho.

Akun vikaantuminen voi johtua myös monista muista syistä. Esimerkiksi huono kennotason suunnittelu (sähkökemiallinen tai mekaaninen), kennojen valmistusvirheet, kennojen ulkoinen väärinkäyttö (lämpötila, mekaaninen tai sähköinen), huonosti suunniteltu akustokokonaisuus, väärin suunniteltu suojauselektroniikka tai vääränlainen laturi voivat aiheuttaa akun vikaantumisen. Akkujen vikaantuminen johtuu kuitenkin harvoin kennotason suunnittelusta. Yleisempi syy on akun valmistusvirhe tai väärinkäyttö (Mikolajczak et al., 2011 s.43–44).

On toki muistettava, että myös polttomoottoria käyttävissä autoissa on selkeä palovaara. Matalasta käynnistysakun ja sähköjärjestelmän jännitteestä johtuen akun tuottama maksimivirta voi olla yli 500 A. Suuri virta aiheuttaa oikosulkutilanteessa hyvin nopean kuumenemisen ohuessa kaapelissa, mikäli sulake ei pala tarpeeksi nopeasti. Lisäksi bensiiniautojen polttoaine on kaasuuntuneena erittäin herkästi syttyvää. Tämä aiheuttaa riskejä erityisesti vuototilanteissa, kolareissa sekä tulipalossa.

## **Litiumioniakkujen vikaantumistyytit**

Vikaantumistyytit voidaan jakaa kahteen luokkaan hajoamismekanismin perusteella: energiseen ja ei-energiseseen. Energisessä vikaantumisessa akun sisällä tapahtuu lämpöä tuottava reaktio, jolloin akun lämpötila kasvaa jopa sen syttymiseen saakka. Ei-energisessä vikaantumisessa lämpötila ei lähde kasvamaan, vaikka taustalla vaikuttavat syyt voivat olla samat. (Mikolajczak et al., 2011 s.45)

Ei-energisiin hajoamismekanismeihin kuuluvat esimerkiksi kapasiteetin pieneminen, sisäisen impedanssin kasvu (pienempi purkuvirta) ja kennon suojamekanismin aktivoituminen. Osa ei-energisistä hajoamismekanismeista liittyy kennon normaaliin vanhenemiseen. Ideaalitapauksessa akun hajoaminen tarkoittaa kapasiteetin ja virranantokyvyn laskemista akun vanhentuessa, eli käytännössä akun kulumista käytössä. Lopulta akku ei enää täytä alkuperäisen käyttökohteen vaatimuksia. Tämä on myös yleisin akun hajoamistapa. (Mikolajczak et al., 2011)

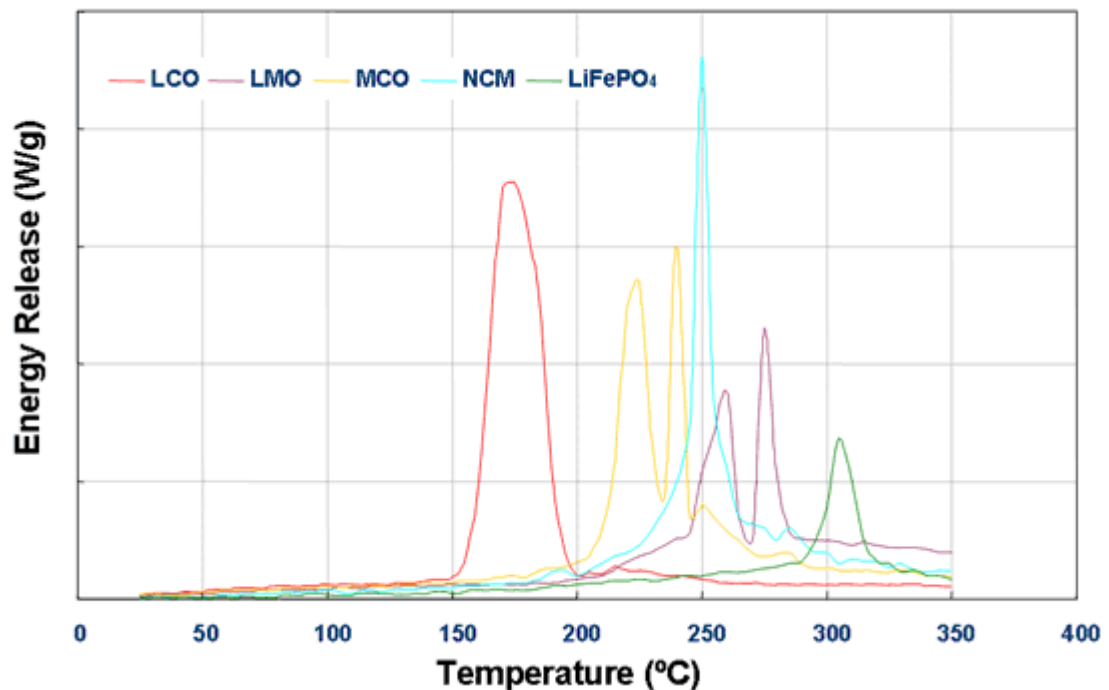
Energisiä hajoamisia yhdistää akkukennon lämpötilan karkaaminen (thermal runaway), jossa akun lämpötila nousee nopeasti akun sisäisen lämpöä tuottavan reaktion vuoksi. Reaktion voimakkuus riippuu akun senhetkisestä varaustilasta, sillä reaktiossa akku luovuttaa varauksensa lämpöenergiaksi.

Reaktio käynnistyy itsestään kennon saavuttaessa tarpeeksi korkean lämpötilan. Tällöin akkukennon sisäinen reaktio tuottaa enemmän lämpöä kuin akku siirtää ympäristöönsä. Tyypillinen täyteen ladattu ja hyvin eristetty 18650-kenno tuhoutuu kahden vuorokauden kuluttua reaktion käynnistymiseen tarvittavan lämpötilan saavuttamisesta. (Mikolajczak et al., 2011 s.42)

Tämä on yksi nimenomaan litiumioniakkuja koskevista turvallisuusongelmista. Esimerkiksi pienimuotoisen tulipalon tai muun lämpötilan nousun johdosta akku saattaa ajautua energiseen hajoamiseen johtavan lämpötilan yläpuolelle, mutta itse akun syttyminen tapahtuu vasta muutamaa vuorokautta myöhemmin.

Herkkyys korkealle lämpötilalle on otettu huomioon akkujen valmistusta ohjaavissa standardeissa. UN:n ja UL:n standardien mukaan täyteen ladatun litiumioniakun tulee kestää säilytys 70 tai 75 celsiusasteen lämpötilassa yli neljän tunnin ajan tai 130 celsiusasteen lämpötilassa 10 minuutin ajan. IEEE:n standardit ovat tiukemmat, ja niiden mukaan akun tulee kestää 130 celsiusasteen lämpötilaa tunnin ajan. (Mikolajczak et al., 2011 s.43)

Kuvassa 19 esitetään positiivisen elektrodin eri valmistusmateriaalien hajoamislämpötiloja. Perinteinen litiumkobolttioksidi hajoaa verrattain alhaisessa 170 celsiusasteen lämpötilassa vapauttaen suuren energiamäärän. Litiumrautafosfaatti on materiaaleista selkeästi turvallisin, sillä se hajoaa vasta yli 300 celsiusasteen lämpötilassa ja luovuttaa muita vertailumateriaaleja vähemmän energiaa. Suurempi hajoamislämpötila johtuu hapen ja fosforin välisestä valenssisidoksesta, jonka hajottaminen vaatii suuremman energian. (Electropaedia, 2016)



Kuva 19: Eri positiivisen elektrodin valmistusmateriaalien hajoamislämpötilat ja hajoamisessa vapautuva energiamäärä. (Electropaedia, 2016) Materiaalit: litiumkobolttioksidi (LCO), litiummangaanioksidi (LMO), litiummangaanikobolttioksidi (MCO), litiumnikkelikobolttimangaani (NCM), litiumrautafosfaatti (LiFePO<sub>4</sub>).

Korkeassa lämpötilassa ongelmaksi muodostuu akkujen herkästi syttyvä hiilivetypohjainen elektrolyytti. Muissa akkutyypeissä elektrolyytti on tyypillisesti vesipohjaista, eikä se aiheuta palovaaraa väärinkäyttötilanteen vedynmuodostusta lukuun ottamatta. Metallinen litium reagoi voimakkaasti veden kanssa, joten litiumioniakuissa ei voida käyttää elektrolyyttinä vesipohjaisia liuottimia. (Mikolajczak et al., 2011 s.86)

Ajoneuvokäytössä turvallisuuden kannalta suurin ongelma on kennon korkeaksi nouseva lämpötila. Täyteen ladatuissa kennoissa lämpötila voi nousta energisessä hajoamisessa jopa yli 600 celsiusasteen. Jotkin katodimateriaalit hajoavat ja vapauttavat samalla pieniä määriä happea, joka voimistaa reaktiota. Sisäisen lämpötilan nousu johtaa separaattorin sulamiseen ja hajoamiseen sekä usein myös alumiinisen virrankerääjän sulamiseen. (Mikolajczak et al., 2011 s.47)

Kennon sisäinen paine kasvaa voimakkaasti elektrolyytin höyrystyessä ja hajotessa. Myös jotkin katodimateriaalit hajoavat lämpötilan kasvaessa. Tämä johtaa usein koteloinnistaan särmikkään tai foliopussiin pakatun kennon turpoamisen, mutta sylinterimäisissä kennoissa havaittavaa turpoamista ei yleensä tapahdu. (Mikolajczak et al., 2011 s.48)

Näiden vaiheiden jälkeen kenno päästää ulos sen sisälle kertynyttä painetta. Pussityypiset akut alkavat usein vuotaa helposti, ja paineen lasku on matalapaineista. Särmiön ja sylinterin malliset kennot on varustettu vuotokohdalla, joka pettää paineen noustessa. Toisinaan ulos purkautuvat kaasut syttymät palamaan, jos ympäristössä on tarpeeksi happea, jolloin kennon kotelon lämpötila tai purkautuvat kipinät sytyttävät kaasun palamaan. (Mikolajczak et al., 2011 s.50)

Kaasuja vuotavat pienet kennot (mobiililaitteet) syttyvät harvoin, mutta esimerkiksi tavallisen 18650-kennon ja isompien akkujen kaasujen syttyminen on yleisempää. Tämä johtuu suuremmasta elektrolyytin määrästä ja kennojen suuresta määrästä isossa akussa. Pieni purkautumisreikä aiheuttaa myös korkeamman kennonsisäisen paineen, jolloin kaasut purkautuvat pienestä reiästä suurella nopeudella. (Mikolajczak et al., 2011 s.50)

Kovakoteloisissa kennoissa painetta pääsee syntymään koteloinnin sisälle ennen sen vuotamista. Täten erityisesti sylinterimäisillä kennoilla sisältö saattaa purkautua paineen mukana ulos kennosta. Tämä saattaa levittää erittäin kuumia kennon osia kauas kennosta tai pahimmillaan levittää tulipalon pidemmälle. (Mikolajczak et al., 2011 s.50)

Huonoimmassa tapauksessa yksittäisen kennon lämmön karkaaminen ja tuhoutuminen aiheuttaa isossa akustossa ketjureaktion. Lämmön siirtyessä akuston muihin kennoihin lämpötila nousee lämpöä tuottavan reaktion tarvitsemalle tasolle, ja ketjureaktio pääsee alkuun. (Mikolajczak et al., 2011 s.53)

Myös sammuttaminen on haastavaa, sillä pelkkä tulipalon sammuttaminen ei välttämättä riitä. Kennon ollessa tarpeeksi kuuma energisen hajoamisen reaktio voi jatkua hetkeä myöhemmin. Yhdysvaltojen ilmailuviranomaisena toimivan FAA:n tutkimusten mukaan lentokoneessa tapahtuvan kannettavan tietokoneen akkupalon suositeltavin sammutusvaihtoehto on vesi. Tällöin sammutuksen lisäksi akun lämpötila laskee matalammalle tasolle. Perinteisten sammutusaineiden, kuten Halon 1211 ja Halon 1301, käyttö pysäyttää palon tehokkaasti, mutta ne eivät jäähdytä kennoa tarpeeksi, jolloin reaktio saattaa jatkua. (Mikolajczak et al., 2011 s.100–104)

### **Energisessä hajoamisessa vapautuva energiamäärä**

Energisessä hajoamisessa kennon sisältämä kemiallinen ja sähköinen energia muuttuu lämmöksi. Energian suuruus riippuu kennon varaustilasta sekä palavien materiaalien määrästä.

Täyteen ladatun 18650-kennon luovuttama energia on laskelmien perusteella 300–320 kJ (Mikolajczak et al., 2011 s.91). Esimerkiksi Tesla Model S:n 85 kWh akusto koostuu

7104 kappaleesta 18650-kennoja. Täyteen ladatun akuston energisessä hajoamisessa purkautuu siis minimissään 2130 MJ energiaa. Tämä vastaa noin 67 litraa tavallista moottoribensiniä, joka on lähellä tavanomaisen auton polttoainesäiliön tilavuutta.

Onkin selvää, että käytettyjen ajoneuvoakkujen pitkäaikaisessa säilytyksessä ja kuljetamisessa on turvallisuusriskejä. Puutteelliset tiedot akkujen todellisesta kunnosta ja sisäisistä vaurioista suurentavat riskejä entisestään. Pahimmaksi tilanne muodostuu, jos useita akkuja säilytetään samassa tilassa lähellä toisiaan. Tällöin ketjureaktio voi levitä akusta toiseen, ja vapautuva energiamäärä voi nousta kokonaisuudessaan hyvin suureksi.

### **2.3.2 Korkeajännite ja käsittely**

Sähkö- ja hybridautoissa käytetään suuren tehotarpeen vuoksi korkeita käyttöjännitteitä, jolloin virran määrä saadaan kohtuulliseksi. Esimerkiksi Teslan Model S –mallin akuston jännite on 375 voltia. Tämä yhdistettynä korkeaan purkuvirtaan tekee jännitteestä hengenvaarallisen.

Autonvalmistajat vaativatkin huollon ja korikorjauksen henkilökunnalta erityistä koulutusta jo hybridimallien kohdalla. Eräillä autonvalmistajilla kaikilla auton kanssa tekemisissä olevalla (esim. auton siirto) henkilökunnalla tulee olla asianmukainen koulutus valmistajan puolelta. Yhdysvalloissa esimerkiksi NHTSA on julkaissut eri toimijoille erityisohjeet sähköautojen kolaritapauksia varten.

### **2.3.3 Käytöstä poistettujen akkujen logistiikka**

Uusia litiumioniakkuja kuljetetaan yleensä noin 50 prosenttiin ladattuna. Akkujen itsepurkautuminen on hyvin pientä (noin 1-5 prosenttia kuukaudessa), jolloin laadukas akku säilyttää kapasiteettinsa turvallisena useita vuosia. Liian matala latausaste voi johtaa korroosioon kennon kuparista valmistetussa varauksenkerääjässä. Korroosion aiheuttama kennon sisäisen impedanssin kasvu saattaa pahimmillaan aiheuttaa kennon energisen hajoamisen käyttöänoton yhteydessä. Toisaalta korkeassa lämpötilassa säilytettynä täyteen ladattuna akku vanhenee huomattavasti nopeammin, joten 50 prosentin latausastetta pidetään yleisesti järkevänä kompromissina turvallisuuden ja vanhenemisen välillä. (Mikolajczak et al., 2011 s.73)

Ajoneuvokäytöstä poistettujen akkujen säilytys ja kuljetus saattaa aiheuttaa muita akkutyyppejä suuremman riskin vaaratilanteeseen. Ajoneuvoakkujen suuri koko tarkoittaa suurta hajoamisessa purkautuvaa energiasisältöä. Lisäksi akun aiempi käyttösuorite ja mahdolliset piilevät vauriot voivat olla epäselviä.

Käytettyjä litiumioniakkuja varten on kehitetty erityisiä kuljetussäiliöitä. Yksi tuotteista on kuvassa 20 esitetty saksalainen Pyrobubbles Lionguard, joka on ruostumattomasta teräksestä valmistettu särmiön mallinen säiliö. Käytetyt akut pakataan säiliön sisälle pienempiin laatikoihin, ja niiden ympärille asennetaan palosuojamateriaalilla täytettyjä tyy-nyjä. Palosuojamateriaalina käytetään 0,5-5 mm raekoon piidioksiidia, jonka luvataan kestävän 1050 celsiusasteen lämpötilan. Lopputuloksen tulisi kestää valmistajan mukaan akkujen energinen hajoaminen aiheuttamatta vaaraa säiliön ulkopuolelle. (uRecycle, 2016)



*Kuva 20: Pyrobubbles LionGuard -kuljetussäiliö, joka kestää valmistajan mukaan akun energisen hajoamisen ilman vaaraa säiliön ulkopuolelle. (uRecycle, 2016)*

Kapasiteetiltaan merkittävästi laskenut ajoneuvoakku saattaa sisältää huomattavan määrän energiaa, sillä monikennoisen akun suorituskyvyn ja kapasiteetin määrittää sen heikoin kenno (Mikolajczak et al., 2011 s.82). Ajoneuvoakuissa käytetään satoja tai jopa tuhansia kennoja, joten kokonaisuudessaan akuston energiasisältö saattaa olla vielä hyvin suuri. Kuljetusvaiheessa akkuja tulee suojata oikosulkujen ja mekaanisten vaurioiden varalta (Mikolajczak et al., 2011 s.82).

### 3 Tulokset

Kiertotalouden avulla ajoneuvokäytössä kasvavaa litiumioniakkujen määrää voidaan käyttää hyödyksi myös muissa käyttökohteissa. Potentiaalisimmat vaihtoehdot taloudellisuuden ja ekologisuuden kannalta ovat akkujen uusiokäyttö eri käyttökohteissa sekä akkujen kunnostus alkuperäiseen käyttökohteeseen.

Kuvassa 21 esitetään akun elinkaareen liittyviä mahdollisuuksia ja vaihtoehtoja. Akku poistuu ajoneuvokäytöstä pääasiassa joko kapasiteetin laskun, suorituskyvyn heikentymisen tai kolarissa aiheutuneen vaurioitumisen kautta.

Käytöstä poistetun akun kunto tulee tarkistaa ennen jatkokäytön päättämistä. Selkeästi kolarissa vaurioitunut akusto voitaisiin kuitenkin siirtää suoraan kierrätettäväksi jatkokäytöstä aiheutuvan suuremman riskin vuoksi. Tarkastuksessa tulisi selvittää akkumoduulien kunto ja soveltuvuus jatkokäyttöön, sekä tehdä mahdollisesti valmistelevia toimenpiteitä kiinnityksen ja liitäntöjen suhteen.

Jos kapasiteetin lasku tai suorituskyvyn heikentyminen johtuu vain yksittäisistä kenoista, akusto voitaisiin siirtää kunnostuksen jälkeen takaisin alkuperäiseen käyttökohteeseen tai uusiokäyttöön. Ideaalitulanteessa kunnostettua akkua käyttämällä sen elinikää voitaisiin jatkaa huomattavasti jopa akuston alkuperäisessä käyttökohteessa. Mikäli kunnostus ei ole taloudellisesti tai ekologisesti kannattavaa, akusto voitaisiin siirtää sen kunnosta riippuen suoraan uudelleenkäyttöön tai kierrätettäväksi.

Myös kierrätys on tärkeä osa kiertotaloutta. Vaikka käytetyt akut on ensisijaisesti järkevin uusiokäyttää ja kunnostaa, niiden käyttöikä on molemmissa tapauksissa rajallinen. Akkuja, kuten mitä tahansa muuta, ei voida kunnostaa tai uusiokäyttää äärettömästi. Lopulta akuista ja niiden sisältämistä materiaaleista tulee kierrättää mahdollisimman suuri osa uusien tuotteiden valmistusta varten. Kierrätyksen kautta on lisäksi mahdollista saada mahdollisimman suuri osa käytettyjen akkujen kokonaismäärästä takaisin kiertoon.

Vuonna 2015 Suomessa myydyn akkukapasiteetin arvo oli karkeasti arvioituna noin 4 miljoonaa euroa akun valmistuskustannuksista laskettuna. Todellisuudessa akkujen varaosahinnat ovat parhaimmillaan moninkertaisia tähän verrattuna, ja näistä laskettuna vuosimyyntin arvo saavuttaa varovaisellakin arviolla yli 10 miljoonaa euroa. Tulevaisuudessa markkinoiden kasvaessa käytettyjen sähkö- ja hybridautojen akkujen kiertotalous on joka tapauksessa todennäköisesti kymmenien miljoonien eurojen arvoinen markkina vuositasona myös Suomessa. Tähän saatetaan päästä nykyisen kasvun jatkuessa jo vuoteen 2020 mennessä. Ajoneuvoalan markkinoiden kokonaissuuruuteen verrattuna akku-markkinoiden osuus on pieni, mutta silti tarpeeksi merkittävä alalle syntyviä toimijoita varten.

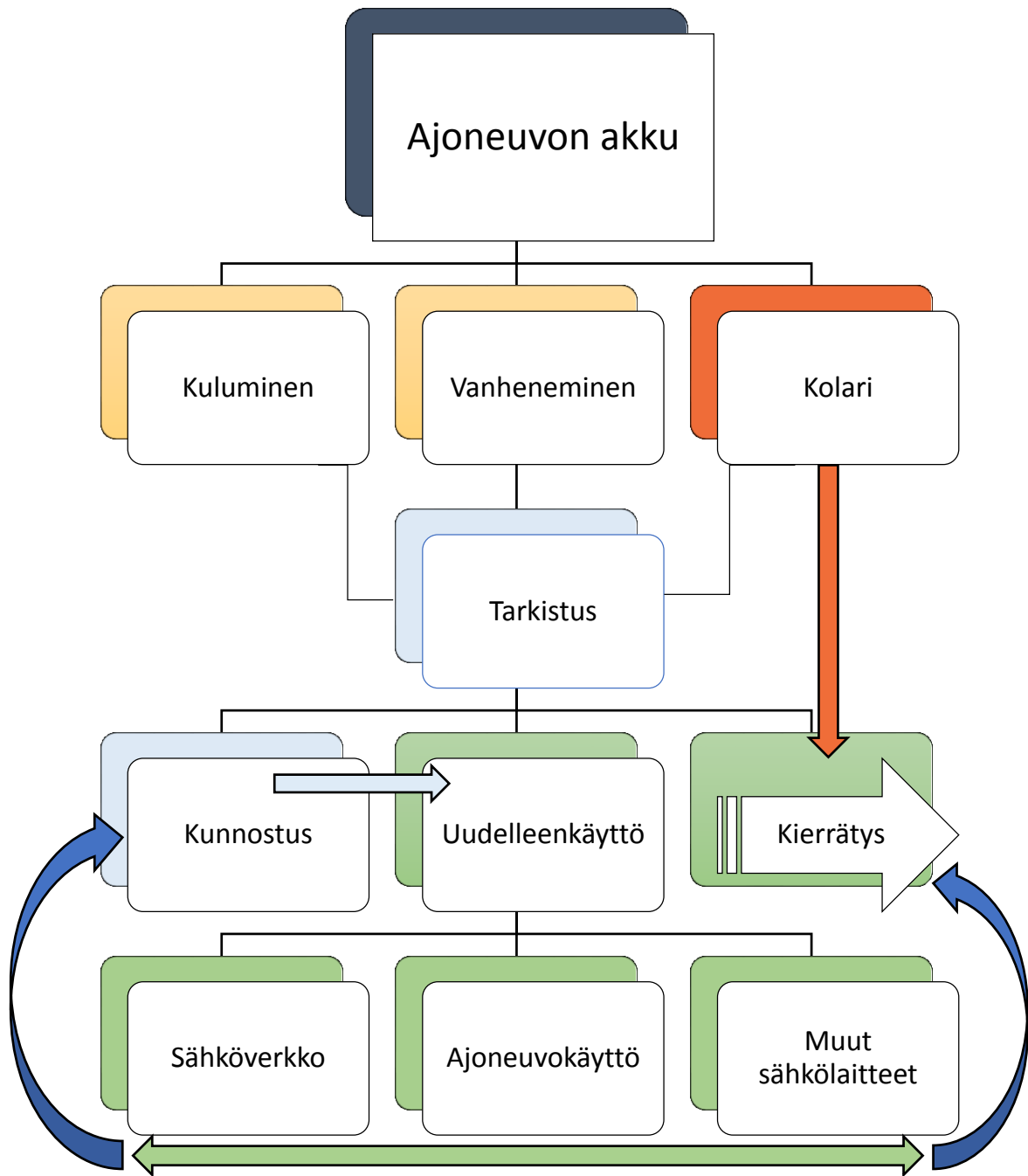
Akkumarkkinoiden koon arviointi tulevaisuudessa on haastavaa, sillä teknologia, lainsäädäntö ja kuluttajatottumukset kypsyvät markkinoiden mukana. Esimerkiksi suurikapasiteettisen Tesla Model S:n saapuminen markkinoille kasvatti myyntiä akkukapasiteettia huomattavasti myös Suomessa. Tulevaisuudessa myyntimäärät voivat kasvaa merkittävästi valikoiman laajentuessa, ja sähkö- ja hybridautojen siirtyessä yhä suurempaan



osaan ajoneuvosegmenteistä. Alan julkaisuissa ja tutkimuksissa saattavat kuitenkin näkyä toimijoiden omat intressit, jotka kohdistuvat sähköautojen yleistymiseen ja akkuteollisuuden kasvuun.

Sähköautoiluun liittyy edelleen haasteita, vaikka esimerkiksi mukavuuteen, suorituskykyyn ja kantamaan liittyviin ominaisuuksiin on saatu selkeitä parannuksia. Autoihin liittyvät ongelmat koskevat akkujen, ja sitä kautta autojen, korkeita valmistuskustannuksia, latauksen nopeutta ja akuston kantamaa. Näiden ongelmien ratkaiseminen vaikuttaa todennäköisesti voimakkaasti sähköautojen ja ladattavien hybridautojen yleistymiseen. Autojen yleistyminen aiheuttaa kehitystarpeita myös sähköntuotannon puolella.

Yksi kiertotalouteen kohdistuvista haasteista on globaalien lakien ja säännösten puute, sekä valtiotasolla pidemmän aikavälin suunnitelmien puute. Erilaisilla sähköautoihin kohdistetuilla tukitoimilla ja verohelpotuksilla on hyvin huomattava merkitys autojen myyntimäärään. Esimerkiksi aiempina vuosina Suomessa leasingkäyttäjälle tarjotut energiatuet saattoivat palauttaa auton hankkijalle yli 10 000 euroa kolmen vuoden leasingsovimuksen aikana. Tulevaisuuden tukien ollessa epäselviä myös alan kasvun arviointi aiheuttaa haasteita, ja siihen saattaa kohdistua äkillisiä muutoksia. Tämä rajoittaa varmasti alalle syntyvien toimijoiden määrää, sillä epävarma tuotto pienentää yrityksien investointihalukkuutta.



Kuva 21: Ajoakun elinkaaren mahdollinen toimintamalli. (Kuva: Markus Markkanen)

### 3.1 Akkujen uusiokäyttö

Tulevaisuudessa sähköverkkoihin liitettyjen litiumioniakkujen määrän uskotaan kasvavan voimakkaasti. Ajoneuvoakkujen uusiokäyttö vastaavassa kohteessa antaisi akuille runsaasti lisäarvoa taloudellisesti sekä ekologisesti. Taulukossa 8 esitetään uusiokäytön eri mahdollisuuksien SWOT-analyysi.

Parhaimmillaan akusto soveltuisi sellaisenaan jatkokäyttöön, jolloin akusta saatu taloudellinen ja ekologinen hyöty olisi erityisen suuri. Suoraan uusiokäyttöön siirretty akusto olisi myös ekologisesti kannattavin vaihtoehto, sillä se lisäisi akuston kokonaiskäyttöikää parhaimmillaan yli 60 prosenttia. Uusiokäytön avulla tarve uusien akkujen valmistukselle matalakuormaisiin kohteisiin, kuten sähköverkon varastoiksi, pienenisi.

Nykyisten sähkö- ja hybridautojen akkupakettien varaosahinnat liikkuvat yli 10 tuhanessa eurossa. Hintataso laskee todennäköisimmin valmistusmäärien kasvaessa, mutta käytetyillä ajoneuvoakuilla on silti selkeä taloudellinen potentiaali tulevaisuudessa. Uusiokäyttöön siirtymällä osa akkupaketin kalliista valmistushinnasta voidaan siirtää ajoneuvon käyttäjän hyödyksi useiden tuhansien eurojen jälleenmyyntiarvon kautta.

Uusiokäytössä Suomen viileästä ilmastosta on selkeitä etuja useisiin muihin maihin verrattuna. Simulaatioiden perusteella voidaan olettaa, että 15 vuotta ajoneuvokäytössä ollut akusto kestää sähköverkon kuormituksen tasausta vielä yli 10 vuotta. Uusiokäytöstä ei myöskään koidu merkittäviä lisäkustannuksia akuston irrotusta, tarkistusta, logistiikkaa ja asennusta lukuun ottamatta.

Taloudellisesta näkökulmasta kannattavimpana pidetty sähkön hinnanvaihtelun mukaan tehty taseus saattaisi muuttaa markkinoita merkittävästi hetkellisen sähköntarjonnan helpottuessa. Tällöin taloudellinen hyöty saattaisi laskea lähemmäs uusiutuvien energiamuotojen ja sähköverkon kuormituksen tasausta. Kuormituksen tasauksen etuna olisi energiantuotannon ja sähköverkon pienempi investointi- ja mitoitusstarve hetkellistä kuormitusta varten. Tällä voitaisiin saavuttaa hyvin merkittäviä säästöjä energia-alan infrastruktuurissa. Lisäksi sähköverkkoon kytketyillä akuilla saataisiin parannettua verkon vikasietoa sekä tarjottua katkeamatonta sähkönsyöttöä huolto- ja vikatilanteiden ajaksi. Uusiutuvan energian tuotannon kannalta suurin hyöty tulee tuotannon vaihtelun mahdollistamisesta. Näin esimerkiksi päiväsaikaan tuotettu sähkö voidaan käyttää vasta yöllä.

Ajoakkujen standardoinnin puute vaikeuttaa kuitenkin merkittävästi akkujen uusiokäyttöä. Ajoakuissa käytetään valmistajasta ja automallista riippuen erilaisia jännitetasoja, liitäntöjä, kiinnityksiä sekä akunhallintajärjestelmiä. Näiden yhtäläistäminen parantaisi uusiokäytön taloudellista potentiaalia ja helpottaisi käyttöönottoa. Yhtäläiset akunhallintajärjestelmät helpottaisivat myös akun historian selvitystä ja diagnostiikkaa sopivan käyttökohteen ja käyttöiän löytämiseksi.

Ajoneuvokäytössä elinikänsä loppuun palvelleeseen akuston uusiokäyttöön liittyy lisäksi runsaasti vastuukysymyksiä. Akuston tulevasta kestosta, elinajan vaurioista ja muista riskeistä ei välttämättä saada tarpeeksi tietoa. Markkinoiden muodostumisen kannalta onkin

olennaista, että jokin alan toimija ottaa vastuun myydyistä akuista. Vastuunottaja voi olla esimerkiksi autonvalmistaja, akun tarkastanut korjausyritys tai vakuutusyhtiö.

Lisäksi käytettyjen ajoneuvoakkujen korkea taloudellinen potentiaali saattaa ajaa joitakin alan toimijoita väärinkäytöksiin. Esimerkiksi kolarissa vaurioitunut visuaalisesti ehjä akusto voidaan yrittää myydä käyttökuntoisena, vaikka vauriot akun kuorirakenteiden sisällä ovat mittavat. Moni akustoista on sinetöity saumoittamalla valmistusvaiheessa, jolloin nopea ja edullinen visuaalinen tarkistus akuston kuoren alle ei ole mahdollista. Eri-tyisesti akuston kuntoa epäiltäessä käytetty ajoakku kannattaisi tutkia, huoltaa ja mahdollisesti kunnostaa.

Uusiokäytön kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi asennuskohteen sijainti sekä akun purkaussyvyys uusiokäytössä. Akuston kestoikä jää huomattavasti lyhemmäksi, mikäli kohdepaikan lämpötila on korkea tai akuston kapasiteetista halutaan käyttää yli 50 prosenttia. Esimerkiksi sähköverkkoon liitettyjä akkuja onkin kannattavinta hankkia viileän ilmaston maihin.

*Taulukko 8: Akkujen uusiokäytön SWOT-analyysi*

<p><b>Vahvuudet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Akku soveltuu uusiokäyttöön suoraan ajoneuvokäytöstä</li> <li>- Sopivilla käyttökohteilla ekologisesti ja taloudellisesti kannattavin vaihtoehto</li> <li>- Tukee uusiutuvan energian tuotantoa mahdollistamalla tuotannon vaihtelua esim. puolipilvisellä säällä</li> <li>- Pitkä kesto Suomen matalassa keskilämpötilassa</li> </ul>	<p><b>Heikkoudet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vastuukysymykset, kuka vastaa käytetystä akusta?</li> <li>- Korkean keskilämpötilan maissa kestoikä jää lyhyeksi</li> <li>- Standardien puute: jännite, liitännät, kiinnitykset, fyysinen koko ja BMS erilaisia eri akuissa</li> </ul>
<p><b>Mahdollisuudet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kausiluontoisen energiantuotannon kasvattaminen</li> <li>- Energiantuotannon ja sähköverkon mitoittaminen lähemmäs keskikulutusta piikkitehojen sijaan</li> <li>- Sähköverkon vikasiedon kasvattaminen</li> <li>- Katkeamaton sähkönsyöttö huolto- ja vikatilanteiden ajalle</li> <li>- Pienempi tarve uusille akuille sähköverkon energiavarastoissa</li> <li>- Akkujen arvon säilyminen käyttöiän eri vaiheissa</li> </ul>	<p><b>Uhat:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Akuston aiempi käyttösuorite ja kunto voivat olla epäselviä</li> <li>- Akun piilevät viat</li> <li>- Akkujen korkea jälleenmyyntiarvo voi aiheuttaa väärinkäyttöä</li> <li>- Turvallisuusongelmat, tulipaloriski</li> </ul>

### 3.2 Akkujen kunnostus

Akkujen kunnostus olisi ajoneuvoalan kiertotaloudelle tyypillinen toimintatapa. Erinäisiä autojen osia on kunnostettu jo pitkään vaihto-osa -periaatteella. Tällöin auton alkuperäinen osa, esimerkiksi rikkoutunut laturi, toimitetaan vaihdossa kunnostettua osaa vastaan. Korjauksessa käytetään käytetyn osan runkoa ja muita käyttökelpoisia komponentteja sekä vaihdetaan tarvittavat ja tyypillisesti hajoavat sisäiset komponentit. Ranskalaisen Renaultin kiertotalouden ja kunnostuksen avulla saavuttamat säästöt materiaalivirroissa ja energiankulutuksessa ovat rohkaisevia. Edellä esitetty toimintatapa soveltuisi erittäin hyvin myös sähköautojen ajoakuille.

On kuitenkin epätodennäköistä, että autotehtaat laajentaisivat ydinsaamisalueeltaan käytettyjen ajoneuvoakkujen kunnostukseen. Myös muualla ajoneuvojen kiertotaloudessa vaihto-osat toimittaa useimmiten kolmas osapuoli. Myös suomalaiseen yrityskulttuuriin kuuluvat perinteisesti pitkät alihankintaketjut, joten erilliset akustoihin erikoistuneet korjaamoyritykset saattaisivat olla yksi mahdollisuus tulevaisuudessa.

Taulukossa 9 esitetään akkujen kunnostuksen SWOT-analyysi. Selkein vahvuus kunnostuksessa on akun jäljellä olevan taloudellisen ja ekologisen potentiaalin hyödyntäminen. Kunnostuksen avulla monikennoisen akuston käyttöikä voidaan jatkaa merkittävästi vaihtamalla sen heikoimmat kennot uusiin. Samalla käyttöhistorian, tarkistuksen ja mittausten perusteella käytetyn akuston todellisesta kunnosta saadaan tarkempaa tietoa sopivaa käyttökohdetta varten. Kunnostustoiminnan avulla voisi olla mahdollista selvittää tarkemmin ajoneuvokäytöstä aiheutuvia akun ikääntymismekanismeja. Näitä tuloksia voitaisiin hyödyntää myös uusien akkujen suunnittelussa ja valmistamisessa entistä paremman lopputuloksen saavuttamiseksi.

Parhaimmillaan kunnostetun akun käyttöä voitaisiin jatkaa alkuperäisessä ajoneuvossa kapasiteetti- ja tehovaatimusten täytyessä. Tällöin saavutettaisiin suurimmat kustannussäästöt uusien akkujen vaihtamiseen verrattuna. Lisäksi kunnostustoiminnan avulla ajoneuvokäytöstä poistetusta heikkokuntoisesta akusta voitaisiin saada suurempi kapasiteetti uusiokäyttökohteeseen.

Kunnostukseen liittyy kuitenkin myös ongelmia. Sähkökemiallisten mittausten epätarkkuuden johdosta akuissa piilevät vauriot eivät välttämättä käy esille, jolloin akun jatkokäytöstä voi pahimmillaan seurata uuden vaurioitumisen lisäksi tulipalovaara. Tätä ongelmaa voidaan yrittää kiertää akuston käyttöhistoriaa tutkimalla ja esimerkiksi kolariakkujen kunnostusta ja uudelleenkäyttöä välttämällä. Kunnostus vaatii lisäksi ainakin tällä hetkellä kallista käsityötä, jonka hinta laskee toiminnan kannattavuutta. Uusien akustojen hyvin kalliit valmistuskustannukset ja varsinkin loppukäyttäjille koituvat hankintahinnat tekevät korjaustoiminnasta todennäköisesti silti järkevää pitkälle tulevaisuuteen.

Vaurioituneiden akkujen logistiikka on yksi korjaustoiminnan ongelmakohdista. Logistiikkaa varten on kuitenkin tarjolla erilaisia kuljetusastioita, joiden pitäisi kestää akuston energinen hajoaminen ilman tulipalon vaaraa astian ulkopuolella. Toisaalta säiliöiden käyttö akustojen varastointiin kunnostusyrityksessä vie tilaa ja heikentää kannattavuutta.

Lisäksi eri valmistajien akkujen erilaiset rakenteet tuovat haasteita kunnostukseen. Ajoneuvoakkuihin liittyvät standardit helpottaisivat kunnostustyötä, ja vähentäisivät tarvittavien varaosien määrää. Kaikkia ajoneuvoakkuja ei myöskään ole suunniteltu purettavaksi, jolloin kunnostus muuttuu haastavammaksi.

*Taulukko 9: Akkujen kunnostuksen SWOT-analyysi*

<p><b>Vahvuudet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Heikoimpien kennojen vaihdolla akulle voidaan saada pitkä käyttöikä alkuperäisessä käyttökohteessa</li> <li>- Vain heikoimmat kennot kierrätykseen, vähän hukkaa</li> <li>- Saadaan tarkempaa tietoa akun kunnosta</li> <li>- Akun päivitys ja modernisointi mahdollista (esim. BMS, jäähdytys tai liittimet)</li> <li>- Ekologisesti kannattavaa, vaikuttaa myös mielikuviin, markkinointiin ja brändiin</li> </ul>	<p><b>Heikkoudet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vaatii ammattitaitoista henkilökuntaa ja oikeanlaiset tilat sekä laitteet</li> <li>- Hidasta käsityötä, käsityön hinta</li> <li>- Sähkökemialliset mittaukset eivät välttämättä paljasta akun vaurioita</li> <li>- Standardoinnin puute, merkki- ja mallikohtaiset ratkaisut akuissa</li> <li>- Vastuukysymykset, kuka vastaa kunnostetusta akusta?</li> </ul>
<p><b>Mahdollisuudet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Akkujen myynti kunnostettuna varaosana</li> <li>- Ajoneuvoakkujen hinnan kohtuullistaminen</li> <li>- Liiketoimintariskin vähentäminen esim. leasingtoiminnassa ja käytettyjen autojen kaupassa</li> </ul>	<p><b>Uhat:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Turvallisuus, korkeajännite, suuri oikosulkuvirta ja palovaara</li> <li>- Vaurioituneiden akkujen logistiikka ja säilytys</li> <li>- Akuissa piilevät viat</li> </ul>

### 3.3 Akkujen kierrätys

Akkujen kierrätys on helppo tapa toimia, ja siihen kohdistuvat haasteet ovat muista kierrätyksen vaihtoehdoista poikkeavia. Erilaisten ja entistä tehokkaampien kierrätysprosessien kehittämisestä saataisiin kuitenkin merkittävää ekologista hyötyä. Vaikka uudelleenkäyttö ja kunnostus ovat toimintakykyisille akuille kannattavia ratkaisuja, kierrätys on kuitenkin näistä prosesseista tärkein. Kierrättämällä loppuun saakka käytetyt ja kunnostetut akut saadaan jalostettua materiaaliksi uusia akkuja varten. Taulukossa 10 esitetään akkujen kierrätyksestä tehty SWOT-analyysi.

Nykyisin käytössä olevat pyro- ja hydrometallurgiset prosessit eivät ole ideaaleja, sillä läheskään kaikkia akun materiaaleja ei saada talteen. Osasyynä prosessien ongelmiin voi olla litiumioniakkujen vaihtelevat akkukemiat. Kierrätystä voitaisiin helpottaa esimerkiksi akkuihin valmistusvaiheessa asennettavilla RFID-siruilla, joista voitaisiin lukea koneellisesti käytetty akkukemia ja kennojen tyyppi. Tämän jälkeen eri akut voitaisiin myös erotella koneellisesti niiden tyypistä riippuen.

Huomattava osa ongelmasta on kuitenkin taloudellista – esimerkiksi muovien ja litiumin kierrätys ei ole tällä hetkellä taloudellisesti kannattavaa. Vanhemmissa litiumioniakuissa koboltin suurella osuudella on ollut merkittävä vaikutus kierrätyksen taloudelliseen kannattavuuteen. Koboltin suuri osuus on toki näkynyt myös kalliimpina valmistuskustannuksina. Nykyisissä sekaelektrodeissa koboltin määrä on kuitenkin huomattavasti pienempi, eikä virrankerääjinä käytettyjen alumiinin ja kuparin kierrätys ole taloudellisesti yhtä kannattavaa.

Lisäksi EU:n akkukierrätystä koskeva direktiivi 2006/66/EC on varsin väljä litiumioniakkuja ajatellen. 50 prosentin kierrätystavoitteeseen on helppo päästä melko vähäisellä akkumateriaalin kierrättämisellä, sillä lähes puolet ajoneuvoakkujen massasta on kennoja suojaavia metallisia ja muovisia tukirakenteita. Tukirakenteiden metalliosien lähes 100-prosenttisella kierrättämisellä päästään jo huomattavaan osaan koko akuston kierrätystavoitteesta.

Materiaalien matala kokonaiskierrätysaste johtaa uusien materiaalien suurempaan tarpeeseen ja jätteen syntymisen kasvuun. Materiaalien riittävyyden varmistamiseksi kierrätysprosesseja tulisikin kehittää selvästi. Maankuoren rajallisten varaintojen takia myös litiumille soveltuvan taloudellisesti kannattavan kierrätysprosessin löytäminen voi olla tärkeää pitkällä aikavälillä. Lisäksi osalle litiumioniakkujen raaka-aineista löytyy vain vähäinen määrä tuottajia, jolloin hinnoittelu riippuu voimakkaasti muutamasta tuottajasta. Tämä voi osoittautua pidemmällä aikavälillä merkittäväksi valmistuskustannuksien kanalta.

On ekologisesti kannattavaa, että akkujen uusiokäyttöä ja kunnostusta jatketaan vähintään niin kauan, kun se on taloudellisesti järkevää. Näin jätteen synty voidaan minimoida tulevaisuudessa. Tämän avulla myös varaosalogistiikalle on tarjolla komponentteja puretuista ja hyväkuntoisista akuista.

Myös litiumioniakkuja koskevat kierrätysmääräykset vaatisivat tarkennusta. Erityisesti ajoneuvoakuissa akkujen suojarakenteet tulisi käsitellä erikseen, ja todellinen kierrätystavoite tulisi kohdistaa itse akkukennoihin. Tällä voitaisiin helpottaa materiaalien riittävyyttä pidemmälle tulevaisuuteen. Kierrätyksen tehokkuuteen kohdistuvat määräykset tulevat hyvin todennäköisesti kiristymään tulevaisuudessa, minkä seurauksena kierrätyksen todelliset kustannukset ja riskit saattavat kasvaa.

*Taulukko 10: Akkujen kierrätyksen SWOT-analyysi*

<p><b>Vahvuudet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Helppo tapa toimia</li> <li>- Kierrätys on toimiva markkinointitermi todellisista prosesseista riippumatta</li> <li>- Ei vastuukysymyksiä logistiikkaa lukuun ottamatta</li> </ul>	<p><b>Heikkoudet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kaikkia akun komponentteja ei saada talteen</li> <li>- Ei hyödynnä akussa jäljellä olevaa käyttöpotentiaalia</li> <li>- Ei ekologisesti eikä taloudellisesti erityisen kannattavaa</li> <li>- Ei erityisen tehokasta markkinoinnin ja brändin kannalta</li> <li>- Väljät kierrätystavoitteet</li> <li>- Varaosalogistiikka ei saa komponentteja</li> </ul>
<p><b>Mahdollisuudet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Turvallinen tapa kierrättää heikkokuntoiset akut</li> <li>- Kierrätyksen avulla mahdollista saada käytetyt akut takaisin kiertoon</li> <li>- Tulevaisuuden kehittyneemmät kierrätysmenetelmät parantavat kokonaisuutta</li> </ul>	<p><b>Uhat:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Raaka-aineiden loppuminen, mikäli kierrätysmenetelmällä ei saada kaikkea talteen</li> <li>- Vähäinen määrä raaka-aineiden tuottajia, hinnoittelun voimakas riippuvuus tuottajista</li> <li>- Kiristyvät määräykset kierrätyksen tehokkuudesta ja uusiokäytön mahdollisuuksista voivat nostaa kierrätyksen todellisia kustannuksia ja riskejä</li> </ul>



## 4 Pohdinta

Diplomityön tavoitteena oli selvittää, millaisia mahdollisuuksia kiertotalous tarjoaa sähkö- ja hybridiajoneuvoissa loppuun käytetyille akuille. Kiertotalouden tavoitteena on jätteen määrän minimointi ja materiaalien käytön tehostus. Tulevaisuudessa sähkö- ja hybridiautojen määrän oletetaan kasvavan huomattavasti, jolloin myös akkujätteen määrä tulee kasvamaan voimakkaasti. Tällä hetkellä kierrätyksen avulla osa akuissa käytetyistä materiaaleista saadaan kiertoon uusien akkujen valmistamista varten. Tämä ei kuitenkaan käytä hyödyksi akkujen jäljellä olevaa kapasiteettia.

Akkujen uusiokäyttö ja kunnostus olisivatkin kiertotalouden näkökulmasta kannattavia toimenpiteitä ajoneuvokäytössä palveluille suurikokoisille akuille. Niiden avulla akkujen taloudellinen ja ekologinen potentiaali voidaan käyttää pelkkää kierrätystä paremmin hyväksi. Kierrätyksen tärkeyttä ei kuitenkaan tule vähätellä, sillä akkuja ei voida käyttää uudelleen ja kunnostaa loputtomiin. Kokonaiselinkaaren lopuksi on tärkeää, että kierrätyksen avulla mahdollisimman suuri osa akuissa käytetyistä materiaaleista saadaan hyödynnettyä.

Tällä hetkellä litiumioniakkuja koskevat kierrätysmääräykset ovat melko väljiä, sillä kierrätykseen saapuvan akuston koko massasta täytyy säännösten mukaan kierrättää 50 prosenttia. Ajoneuvoakkujen tapauksessa akustoa suojaavasta metallirakenteisesta koteloinnista muodostuu merkittävä osa akuston massasta, jolloin kierrätysrajat muuttuvat entistä väljemmiksi. Käytännössä suojakuoren metallirakenteet kierrättämällä saavutetaan jo merkittävä osa akuston kokonaiskierrätysosuudesta.

Kiertotalouden taloudellisen kannattavuuden kannalta merkitseviä ovat myös globaalisti ja valtiotasolla tehdyt pidempiaikaiset suunnitelmat ja säännökset. Esimerkiksi tällä hetkellä sähköautojen myyntiä edistetään verohelpotuksilla ja tuilla, jotka eivät kuitenkaan säily samana vuodesta toiseen. Yleisesti autokierrätyksessä on kokeiltu esimerkiksi romutuspalkkiota sekä sähkö- ja hybridiautoille annettua energiatukea. Lyhytaikainen ja väliaikaiseksi suunniteltu tuki ei kuitenkaan takaa alan yleistä kasvua pidemmällä aikavälillä. Tämän seurauksena investointien perustelu yrityksille on vaikeampaa, erityisesti kirjoitushetken taloudellisesti haastavana ajankohtana.

Lisäksi akustojen suunnitteluvaiheessa tehtyjen päätösten vaikutusta kiertotalouteen ei voida vähätellä. Ajoakkujen standardoinnin puute ja akkukemioiden vaihtelu aiheuttavat selkeitä ongelmia kiertotalouden kannalta. Esimerkiksi yhtäläisten jännitetasojen, ulkomittojen ja kiinnitysten sekä liitäntöjen käyttö helpottaisi uusiokäyttöä ja kierrätystä merkittävästi.

Kiertotalouden ja ajoneuvoakkujen yhdistämisellä on joka tapauksessa selkeää taloudellista potentiaalia. Vuonna 2015 Suomessa myytyjen sähkö- ja hybridiautojen ajoakkujen arvo on arvion mukaan noin 4 miljoonaa euroa pelkästään akun valmistuskustannuksilla laskettuna. Varaosahintojen ja mahdollisen jälleenmyyntiarvon avulla laskettuna arvo voi nousta vuositasolla yli 10 miljoonan euron. Lisäksi alan ennustettu kasvu maailmalla ja Suomessa tekevät liiketoiminnasta mielenkiintoista myös Suomen pienillä markkinoilla.

Suomessa vuosittain myydyn akkukapasiteetin arvo olisi noin 20 miljoonaa euroa vuoteen 2020 mennessä nykyisillä valmistuskustannuksilla laskettuna ja mahdollisesti 100 miljoonaa euroa varaosahintojen arvolla laskettuna. Näiden arvioiden perusteella ekologisen kannattavuuden lisäksi uusiokäyttö ja kunnostus tarjoavat myös suuren taloudellisen potentiaalin Suomen rajojen sisäpuolella.

Uusiokäyttöön ja kunnostukseen liittyy kuitenkin selkeitä haasteita. Yksi ongelmista on paloherkkiin litiumioniakkuihin liittyvät vastuukysymykset. Turvallisuus aiheuttaa ongelmia ketjun eri vaiheissa – myös logistiikkaa varten on kehitetty litiumioniakuille suunniteltuja kuljetusastioita. Akuston piilevät viat voivat aiheuttaa esimerkiksi tulipaloriskin uudessa käyttökohteessa. Markkinoiden muodostumisen kannalta voi olla olennaista, ottaako vastuun akuston myyjä, kunnostaja vai esimerkiksi vakuutusyhtiö. Käytettyjen akkujen korkean jälleenmyyntiarvon vuoksi on mahdollista, että visuaalisesti ehjiä, mutta esimerkiksi kolarissa vaurioituneita akkuja myydään käyttökuntoisina niiden korkean taloudellisen potentiaalin vuoksi. Tämä lisää markkinoiden riskejä entisestään.

Työssä onnistuttiin selvittämään kiertotalouden eri vaihtoehtojen ekologista ja taloudellista kannattavuutta käytetyille sähköautojen akuille. Myös eri toimintavaihtoehtoihin liittyviä vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia saatiin selvitettyä.

## **4.1 Tulevaisuuden tutkimusaiheita**

Tulevaisuudessa akkujen kiertotalouteen liittyen olisi tärkeää tutkia erityisesti suunnitteluvaiheen ja standardoinnin tuomia etuja uusiokäytön kannalta. Tulevaisuutta ajatellen olisi tärkeää tietää, millä tavalla standardointi vaikuttaa uusiokäytön ja kunnostuksen taloudelliseen ja ekologiseen potentiaaliin. Käytetyt ajoneuvoakut päätyvät uusiokäyttöön huomattavalla viiveellä, joten mahdollisten ongelmakohtien selvittäminen tulisi aloittaa mahdollisimman aikaisin. Tavoitteena voisi olla selvittää minimissään tarvittavat standardointitoimenpiteet (esim. jännitetasot, liitännät ja fyysinen paketointi), jotka helpottaisivat uusiokäyttöä ja kunnostusta merkittävästi.

Taloudellisesta näkökulmasta kannattaisi tutkia myös kiertotalouden menetelmiin soveltuvan akuston minimikokoa. Käytännössä tämä tarkoittaisi selvitystä siitä, minkä kokoisten akustojen käyttäminen uusiokohteissa ja kunnostuksessa olisi taloudellisesti kannattavaa. Voi esimerkiksi olla mahdollista, että edullisemman työvoiman maissa kannettavien tietokoneiden ja akkukäyttöisten työkalujen akkujen purkaminen erillisten 18650-kennojen palauttamiseksi olisi taloudellisesti kannattavaa.

Kiertotalous on kiinnostuksen kohteena voimakkaassa kasvussa, ja akkumarkkinat ulottuvat runsaasti myös ajoneuvoakkujen ulkopuolelle. Täten myös muiden sähkölaitteiden akkujen kiertotalouskäytön vaihtoehtoja tulisi tutkia jatkossa.

## Lähdeluettelo

ABB. 2012. ABB and partners to evaluate the reuse of the Nissan LEAF battery for commercial purposes. [Viitattu 10.5.2016]. Saatavissa: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/a2b2d2aff96520bec1257989004e62ae.aspx>

Aguirre, K., Eisenhardt, L., Lim, C., Nelson, B., Norring, A., Slowik, P., Nancy, T.. 2012. Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle. PDF. Saatavilla: <http://www.environment.ucla.edu/media/files/Battery-ElectricVehicleLCA2012-rh-ptd.pdf>

Audi. 2015. Audi Future Performance Days 2015. PDF. Saatavissa: <https://www.audi-mediacentr.com/en>

Autoalan tiedotuskeskus. 2015. Valtion verotulot liikenteestä 2007-2014. [Viitattu 20.1.2015]. Saatavilla: [http://www.autoalantiedotuskeskus.fi/tilastot/verotus\\_ja\\_hintakehitys/valtion\\_verotulot\\_tieliikenteesta](http://www.autoalantiedotuskeskus.fi/tilastot/verotus_ja_hintakehitys/valtion_verotulot_tieliikenteesta)

Automotive World. 2016. Nissan's advanced lithium-ion battery plant in Sunderland to make future generation electric vehicle batteries. [Viitattu: 22.5.2016]. Saatavissa: <http://www.automotiveworld.com/news-releases/nissans-advanced-lithium-ion-battery-plant-sunderland-make-future-generation-electric-vehicle-batteries/>

Ban, J., Arellano, J.L., Aguilera, R.F., Tallett, M.. 2015. World Oil Outlook. OPEC. ISBN 978-3-9503936-0-6

Barsukov, Y., Qian, J.. 2013. Battery Power Management for Portable Devices. ISBN 9781608074921.

Battery Bro. 2016. What is the difference between the LG HE2 and LG HE4? Which is newer, better?. [Viitattu 27.4.2016]. Saatavissa: <https://batterybro.com/blogs/18650-wholesale-battery-reviews/19198431-what-is-the-difference-between-the-lg-he2-and-lg-he4-which-is-newer-better>

Battery University. 2016. Charging at High and Low Temperatures. [Viitattu: 27.4.2016] Saatavissa: [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_at\\_high\\_and\\_low\\_temperatures](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures)

BMW. 2015. BMW Group sells more than 2 million vehicles in 2014. [Viitattu: 22.5.2016]. Saatavissa: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0199942EN/bmw-group-sells-more-than-2-million-vehicles-in-2014>

BMW. 2016. BMW Group achieves fifth consecutive record sales year. [Viitattu 22.5.2016]. Saatavissa: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0249765EN/bmw-group-achieves-fifth-consecutive-record-sales-year>

Car and Driver. 2011. The Current Condition and Future Potential of Automotive Batteries. [Viitattu 27.4.2016]. Saatavissa: <http://www.caranddriver.com/features/the-current-condition-and-future-potential-of-automotive-batteries-tech-dept>

- Cardwell, D. 2015. G.M. and Nissan Reusing Old Electric Car Batteries. The New York Times. [Viitattu 27.4.2016] Saatavissa: [http://www.nytimes.com/2015/06/17/business/gm-and-nissan-reusing-old-electric-car-batteries.html?\\_r=1](http://www.nytimes.com/2015/06/17/business/gm-and-nissan-reusing-old-electric-car-batteries.html?_r=1)
- Chevrolet. 2013. Chevrolet Limited Warranty and Owner Assistance Information. [Viitattu 14.3.2016]. Saatavissa: [http://www.chevrolet.com/content/dam/Chevrolet/northamerica/usa/nscwebsite/en/Home/Ownership/Warranty/02-pdfs/2k14chev\\_lim\\_wm2ndprint.pdf](http://www.chevrolet.com/content/dam/Chevrolet/northamerica/usa/nscwebsite/en/Home/Ownership/Warranty/02-pdfs/2k14chev_lim_wm2ndprint.pdf)
- Elektropaedia. 2016. Battery and Energy Technologies: Lithium Battery Failures. [Viitattu 13.4.2016]. Saatavissa: [http://www.mpoweruk.com/lithium\\_failures.htm](http://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm)
- Elkind, E. 2014. Reuse and Repower: How to Save Money and Clean the Grid with Second-Life Electric Vehicle Batteries. PDF.
- Ellen MacArthur Foundation, McKinsey & Co. 2014. Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chain. World Economic Forum. PDF.
- Eyer, J., Corey, G. 2010. Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide: A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. Sandia National Laboratories. PDF.
- Fingrid. 2016. Sähkön kulutus ja tuotanto. [Viitattu: 28.4.2016]. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/kulutus-ja-tuotanto/Sivut/default.aspx>
- Fraunhofer. 2016. Battery Management Systems (BMS). [Viitattu: 28.4.2016]. Saatavissa: [http://www.iisb.fraunhofer.de/en/research\\_areas/energy\\_electronics/stationary\\_battery\\_systems/example\\_of\\_developments/battery\\_management\\_systems\\_bms.html](http://www.iisb.fraunhofer.de/en/research_areas/energy_electronics/stationary_battery_systems/example_of_developments/battery_management_systems_bms.html)
- General Electric. 2016. Energy Storage Technology. [Viitattu: 27.4.2016]. Saatavissa: <https://renewables.gepower.com/innovative-solutions/energy-storage/energy-storage-technology.html>
- General Motors. 2012. GM, ABB Demonstrate Chevrolet Volt Battery Reuse Unit. [Viitattu: 10.5.2016]. Saatavissa: [http://media.gm.com/media/us/en/gm/news-detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Nov/electrification/1114\\_reuse.html](http://media.gm.com/media/us/en/gm/news-detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Nov/electrification/1114_reuse.html)
- Gies, E. 2015. Lazarus Batteries. Nature. Vol. 526. S. 100-101. ISSN: 0028-0836.
- Global Battery Solutions. 2016. Battery Repair Overview. [Viitattu 14.3.2016]. Saatavissa: <http://www.globalbatterysolutions.com/>
- Hess, S., Wohlfahrt-Mehrens, M., Wachtler, M. 2015. Flammability of Li-Ion Battery Electrolytes: Flash Point and Self-Extinguishing Time Measurements. Journal of The Electrochemical Society. Vol. 162. PDF.
- Hodson, Hal. 2015. Power to the People. New Scientist 3031, s. 20-24. ISSN 0262-4079.
- Huynh, P., Mohareb, O., Grimm, M., Reuss, H.-C., Mäurer, H.-J., Richter, A. 2014. Impact of Cell Replacement on the State-of-Health for Parallel Li-Ion Battery Pack. PDF.

- Saatavilla: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=7007084>
- Hybridcars. 2015. Three More Plug-in Cars Cross 25,000 Sales Milestone. [Viitattu 22.5.2016]. Saatavissa: <http://www.hybridcars.com/three-more-plug-in-cars-cross-25000-sales-milestone/>
- ICCT. 2015. Global milestone: The first million electric vehicles. [Viitattu 10.12.2015]. Saatavissa: <http://www.theicct.org/blogs/staff/global-milestone-first-million-electric-vehicles>
- IEA. 2013. Global EV Outlook 2013 Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020. International Energy Agency. PDF. Saatavissa: <http://www.iea.org/evi>
- IEA. 2015. Global EV Outlook 2015 Key Takeaways. International Energy Agency. PDF. Saatavissa: <http://www.iea.org/evi>
- Iron Edison. 2016. Lithium Iron Battery with Management System. PDF. Saatavissa: [https://ironedison.com/images/products/Iron%20Edison/LiFePO4/Iron\\_Edison\\_Lithium\\_Iron\\_SPEC\\_SHEET\\_2016.pdf](https://ironedison.com/images/products/Iron%20Edison/LiFePO4/Iron_Edison_Lithium_Iron_SPEC_SHEET_2016.pdf)
- Jawad, Iain. 2010. Reuse and Recycling to Ensure the Completion of the “Green Car”: Analysis of the Global Market for Automotive Lithium-ion Battery Recycling and Second Life. Frost & Sullivan. PDF.
- Jinqui, X., Thomas, H.R., Francis, R., Lum, K., Wang, J., Liang, B.. 2007. A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. Journal of Power Sources. Vol 177. PDF.
- Linden, D., Reddy, T. B. (2011). Linden’s Handbook of batteries. ISBN: 978-0-07-162421-3
- Mikolajczak, C., Kahn, M., White, K., Long R. T. 2011. Lithium-ion Batteries Hazard and Use Assesment. ISBN: 978-1-4614-3485-6. DOI 10.1007/978-1-4614-3486-3.
- Mitsubishi. 2016. Mitsubishi Outlander MY2016 hinnasto. [Viitattu: 15.4.2016]. PDF. Saatavilla: [www.mitsubishi.fi](http://www.mitsubishi.fi)
- Neubauer, J., Pesaran, A. 2010. PHEV/EV Li-Ion Battery Second-Use Project. National Renewable Energy Laboratory. PDF.
- Neubauer, J., Wood, E., and Pesaran, A. 2015. A Second Life for Electric Vehicle Batteries: Answering Questions on Battery Degradation and Value. SAE Int. J. Mater. Manf. 8(2):2015. doi:10.4271/2015-01-1306. PDF.
- Renault. 2016. 50,000th Renault Zoe rolls off production line. [Viitattu 22.5.2016]. Saatavissa: <http://press.renault.co.uk/press-release/ede099e0-5ee5-4775-a0b6-f10a662fe82a>
- Rombach, E., Friedrich, B. 2014. Recycling of Rare Metals. IME Process Metallurgy and Metal Recycling, RWTH Aachen University. Handbook of Recycling. ISBN 9780123965066.

- Sapru, V. 2014. 2020 Vision: Global Lithium-ion Battery Market. Frost & Sullivan. PDF.
- Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., Roy, J., Schaeffer, R., Sims, R., Smith, P., Wiser, R.. 2014. Annex III: Technology specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. PDF.
- Sitra. 2015. Kiertotalous on Suomelle 2,5 miljardin euron mahdollisuus. [Viitattu 2.3.2016]. Saatavissa: <http://www.sitra.fi/ekologia/kiertotalous>
- Stuart, T., Fang, F., Wang, X., Ashtiani, C., Pesaran, A. 2002. A Modular Battery Management System for HEVs. Natural Renewable Energy Laboratory. PDF.
- Tesla Motors. 2014. Tesla Gigafactory. [Viitattu 27.4.2016]. Saatavissa: <https://www.teslamotors.com/gigafactory>
- Tesla Motors. 2016a. Tesla Fourth Quarter & Full Year 2015 Update. PDF. [Viitattu 22.5.2016]. Saatavissa: [http://files.shareholder.com/downloads/ABEA-4CW8X0/456867397x0x874449/945B9CF5-86DA-4C35-B03C-4892824F058D/Q4\\_15\\_Tesla\\_Update\\_Letter.pdf](http://files.shareholder.com/downloads/ABEA-4CW8X0/456867397x0x874449/945B9CF5-86DA-4C35-B03C-4892824F058D/Q4_15_Tesla_Update_Letter.pdf)
- Tesla Motors. 2016b. Tesla Model S Owner's Manual. PDF. Saatavissa: <https://www.teslamotors.com/sites/default/files/Model-S-Owners-Manual.pdf>
- Tian, J., Chen, M. 2013. Sustainable design for automotive products: Dismantling and recycling of end-of-life vehicles. Journal of Waste Management. Vol. 34. PDF.
- Trafi. 2016. Henkilöautojen ensirekisteröinnit käyttövoimittain. [Viitattu 11.3.2016]. Saatavissa: [http://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ensirekisteroinnit/ensirekisteroinnit\\_kayttovoimittain](http://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ensirekisteroinnit/ensirekisteroinnit_kayttovoimittain)
- Tytgat, J. 2013. The Recycling Efficiency of Li-ion EV batteries according to the European Commission Regulation, and the relation with the End-of-Life Vehicles Directive recycling rate. PDF.
- Ugle, R., Li, Y. 2011. Trip Specific Worthiness of Replacement of Individual Cells for Battery Pack in Electric Vehicles. ISBN: 978-1-61284-248-6
- Umicore. 2016. Umicore Battery Recycling. [Viitattu: 27.4.2016]. Saatavissa: <http://www.batteryrecycling.umicore.com/UBR/>
- uRecycle. 2016. LionGuard®: The Container Concept. [Viitattu 10.3.2016]. Saatavissa: <http://urecycle.eu/lionguard/>